

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



TESIS

**Estudio mineralógico y geoquímico de los procesos de interacción roca –
suelo – vegetación en el transecto Linares – La Ascención, Nuevo León**

PRESENTA
ELIAZAR PLATAS CASTILLO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

ABRIL 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



TESIS

**Estudio mineralógico y geoquímico de los procesos de interacción roca –
suelo – vegetación en el transecto Linares – La Ascención, Nuevo León**

PRESENTA

ELIAZAR PLATAS CASTILLO

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

Vo.Bo. Director de la Tesis

Dr. Fernando Velasco Tapia

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

ABRIL 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



TESIS

**Estudio mineralógico y geoquímico de los procesos de interacción roca –
suelo – vegetación en el transecto Linares – La Ascención, Nuevo León**

PRESENTA

ELIAZAR PLATAS CASTILLO

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

Vo.Bo. Comité de Titulación

Dr. Fernando Velasco Tapia

Dra. Esther María Cruz Gámez

M.C. Pedro Rodríguez Saavedra

Linares, Nuevo León, México

Abril, 2016

AGRADECIMIENTO

A la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL por su apoyo y contribución en mi formación como estudiante de posgrado y en especial a la Sra. Karla Nallely Casas Peña por su amabilidad y atención.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo a través de una Beca de Posgrado.

A mi Director de Tesis, el Dr. Fernando Velasco Tapia, por sus observaciones, comentarios y por haber tenido confianza en mí para realizar este trabajo.

A la Ing. Ana María Garza Castillo por permitirme y tener acceso a su laboratorio para la preparación y calcinación de mis muestras de suelo y raíz.

A la M.C. María Inés Yáñez Díez y a la Dra. Marisela Pando Moreno por permitirme efectuar los análisis edafológicos en el Laboratorio de Suelos y Nutrición de Bosques de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL y aportar su conocimiento en la realización de levantamientos de un perfil de suelo.

A la Dra. Esther María Cruz Gámez y al M.C. Pedro Rodríguez Saavedra, por haber aceptado ser parte del Comité de Revisión de Tesis, así como por su ayuda, comentarios y aportes que enriquecieron este trabajo de tesis.

A la Dra. Patricia Quintana Owen, por su apoyo de los análisis de suelos aplicando el método de difracción de rayos-X, en el departamento de Física Aplicada, CINVESTAV – Instituto Politécnico Nacional (Unidad Mérida).

Al Laboratorio Ultra-limpio y de ICP-MS y a la M.C. Ofelia Pérez Arvizu del Centro de Geociencias, UNAM, por su apoyo en el análisis de geoquímica de las muestras de roca, suelo y raíz. Al M.P. Victoriano Beraza, por su apoyo en la realización de láminas delgadas en el Laboratorio de Preparación de la FCT-UANL.

Al Personal Docente de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL: Dr. Francisco Medina Barrera (Director), Dr. José Rosbel Chapa Guerrero, Dr. Uwe Jenchen, Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta, Dr. Javier Aguilar, Dr. Yolanda Pichardo, M.C. Pedro Rodríguez, Mtra. Manuelita González Ramos y Dr. Carlos Aguilar. Gracias a todos ustedes por haber compartido su conocimiento.

A Jorge Perales por su apoyo durante la salida a campo ... MUCHAS GRACIAS!!!

A todos mis compañeros de generación y amigos de la Maestría, por los buenos momentos vividos durante toda la estancia ... GRACIAS!!!

ÍNDICE

	PÁGINA
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Definición y estructura general del suelo	1
1.2 Factores que controlan el desarrollo del suelo	3
1.3 Metodología del análisis de suelo en México	5
1.4 Clasificación de suelos	6
1.5 Estudios de suelo en la región Noreste de México	7
1.6 Objetivo	10
1.7 Hipótesis de trabajo	10
1.8 Metodología general	10
1.8.1 Preparación previa	10
1.8.2 Trabajo de campo	10
1.8.3 Experimental	10
1.8.4 Elaboración y análisis de bases de datos	11
2. MARCO CLIMÁTICO, GEOLÓGICO Y FORESTAL	12
2.1 Ubicación y Clima	12
2.2 Geología	13
2.3 Evolución tectónica del Noreste de México	13
2.4 Estratigrafía de la Sierra Madre Oriental	20
2.5 Vegetación	25

3. METODOLOGÍA	27
3.1 Selección y muestreo de perfil de suelo	27
3.2 Preparación de muestras	28
3.3 Preparación de láminas y análisis petrográfico	28
3.4 Difracción de Rayos-X	28
3.5 Análisis edafológico	29
3.5.1 Textura	29
3.5.2 Color	31
3.5.3 pH	31
3.5.4 Conductividad eléctrica	32
3.5.5 Materia orgánica	32
3.5.6 Contenido de yeso	33
3.5.7 Contenido de carbonatos	34
3.6 Análisis químico de elementos traza	34
3.7 Base de datos y análisis de información	34
4. RESULTADOS	35
4.1 Ubicación de perfiles edafológicos	35
4.2 Perfil FCF	36
4.2.1 Descripción general	36
4.2.2 Edafología	37
4.2.3 Mineralogía	37
4.3 Perfil LCR	39
4.3.1 Descripción general	39
4.3.2 Edafología	40
4.3.3 Mineralogía	42
4.3.4 Química de elementos traza	42

4.4 Perfil TAP	45
4.4.1 Descripción general	45
4.4.2 Edafología	46
4.4.3 Mineralogía	48
4.4.4 Química de elementos traza	48
4.5 Perfil PAB	51
4.5.1 Descripción general	51
4.5.2 Edafología	52
4.5.3 Mineralogía	54
4.5.4 Química de elementos traza	55
4.6 Perfil ASC	56
4.6.1 Descripción general	56
4.6.2 Edafología	57
4.6.3 Mineralogía	59
4.6.4 Química de elementos traza	59
 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	 61
5.1 Perfil FCF	61
5.2 Perfil LCR	61
5.3 Perfil TAP	65
5.4 Perfil PAB	69
5.5 Perfil ASC	72
5.6 Comentarios finales	75
 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	 78
 REFERENCIAS	 79

RESUMEN

Un estudio inicial sobre la interacción entre roca, suelo y vegetación ha sido realizado en el Noreste de México. De forma específica, cinco perfiles de suelo han sido medidos y muestreados a lo largo del transecto Linares – La Ascensión (Nuevo León): (a) FCF (Facultad de Ciencias Forestales, UANL; Linares, N.L.; coordenadas UTM: 14R0446949, 2741000; altitud: 370 msnm); (b) LCR (Las Crucitas; Linares, N.L.; coordenadas UTM: 14R0423094, 2736922; altitud: 621 msnm); (c) TAP (Tapia, Iturbide, N.L.; coordenadas UTM: 14R0406026, 2735890; altitud: 1646 msnm); (d) PAB (Pablillo, Galeana, N.L.; coordenadas UTM: 14R0397347, 2716947; altitud: 2196 msnm) and (e) ASC (La Ascensión, Aramberri, N.L.; coordenadas UTM: 14R0398843, 2712565; altitud: 2376 msnm). En cada localidad, los diferentes horizontes que constituyen el perfil de suelo (roca madre y estratos edáficos) han sido identificados, medidos y muestreados. Adicionalmente, una raíz de encino, desarrollado sobre el perfil de suelo, ha sido colectada. Pruebas tradicionales de edafología (textura, color, pH, conductividad eléctrica, % materia orgánica y % carbonatos) han sido aplicadas a todas las muestras de suelo. El arreglo de minerales de la roca y las muestras de suelo se ha establecido por petrografía y análisis de difracción de rayos-X. La composición de elementos traza para la roca madre, los horizontes edáficos y la raíz de Encino han sido establecidas por ICP-MS. Como resultado, Los perfiles de suelo han sido clasificados como: (a) FCF: litosol desde una lutita alterada (Formación Mendez), (b) LCR: regosol de caliza alterada (Formación San Felipe), (c) TAP: regosol de arenisca alterada (Formación Taraises), (d) PAB: gypsol de un depósito de yeso (Formación Minas Viejas), y (e) ASC: rendzina de un depósito de coluvión (Cuaternario). Cuarzo, calcita, yeso, albita, montmorillonita e illita constituyen los principales minerales que conforman la roca y las capas de suelo. Como ya se ha documentado en la literatura, las condiciones semiáridas a templadas han restringido el desarrollo de los perfiles de suelo en el área de estudio. Un proceso de alcalinización, acompañado de un incremento de los contenidos de materia orgánica y carbonatos, han prevenido la movilización de elementos traza durante la génesis de los suelos. Las raíces de encino han extraído únicamente Ba, B, Sr y P, así como en ocasiones metales de transición (Ni, Pb, Zn) en cantidades relativamente significativas.

ABSTRACT

An initial study related to interaction between rock, soil, and vegetation has been carried out in Northeastern Mexico. Particularly, five soil profiles have been measured and sampled along the Linares – La Ascensión transect (Nuevo Leon state): (a) FCF (Facultad de Ciencias Forestales, UANL; Linares, N.L.; UTM coordinates: 14R0446949, 2741000; altitude: 370 masl); (b) LCR (Las Crucitas; Linares, N.L.; UTM coordinates: 14R0423094, 2736922; altitude: 621 masl); (c) TAP (Tapia, Iturbide, N.L.; UTM coordinates: 14R0406026, 2735890; altitude: 1646 masl); (d) PAB (Pablillo, Galeana, N.L.; UTM coordinates: 14R0397347, 2716947; altitude: 2196 masl) and (e) ASC (La Ascención, Aramberri, N.L.; UTM coordinates: 14R0398843, 2712565; altitude: 2376 masl). In each location, the different layers (rock source and edaphic horizons) constituting the soil profile have been identified, measured and sampled. Additionally, the root of an oak specimen developed above the soil profile has been collected. Traditional soil tests (texture, color, pH, electrical conductivity, %organic matter, %gypsum and %carbonates) have been applied to all soil samples. Mineralogical arrangements of rock and soil samples have been established by petrographic and X-ray diffraction analyses. Trace-element compositions for rock source, edaphic layers and oak root have been established by ICP-MS. As a result, the soil profiles have been classified as: (a) FCF: litosol from altered shale (Mendez Formation), (b) LCR: regosol from altered limestone (San Felipe Formation), (c) TAP: regosol from altered sandstone (Taraises Formation), (d) PAB: gypsosol from gypsum deposit (Minas Viejas Formation), and (e) ASC: rendzina from colluvium deposit (Quaternary). Quartz, calcite, gypsum, albite, montmorillonite and illite are the main minerals constituting the rock and soil layers. As documented in literature, semiarid to template conditions have restricted the soil profile development in the study area. An alkalization process, accompanied by an increase of organic matter and carbonates contents, have prevented the trace element mobilization during the soil genesis. Oak roots have extracted only Ba, B, Sr and P, as well as sometimes transition metals (Ni, Pb, Zn) in relatively significant quantities.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición y estructura general del suelo

El estudio de las relaciones entre roca, suelo y vegetación representan un tema complejo que involucra factores geológicos, químicos y biológicos. En este apartado se presenta un resumen acerca de los principales conceptos en relación a estos procesos de interacción.

El suelo se ha definido como un cuerpo natural, diferenciado en horizontes conformados por constituyentes minerales y orgánicos, usualmente no consolidado, de profundidad variable, que difiere de su material parental (roca madre) en morfología, propiedades físicas, propiedades químicas y características biológicas (Jenny, 1994).

El origen del suelo es una función de la roca madre, el clima, la vegetación, la edad del terreno y su topografía (Bockheim *et al.*, 2014). De acuerdo a González de Vallejo *et al.* (2002), los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión en sus tres facetas:

- (a) **Física:** Debido a los cambios térmicos (lo que origina dilataciones diferenciales entre los diferentes minerales y da lugar a acciones y fisuras internas) y a la acción mecánica del agua (arrastre de fragmentos ya erosionados; posible acción directa por congelación, que produce tensiones internas por el volumen del hielo respecto al agua; acción alternada de humedad-sequedad a lo largo del tiempo, etc.). Estas acciones físicas tienden a romper la roca inicial y a dividirla en fragmentos de tamaño cada vez más pequeño, que pueden ser separados de la roca por agentes activos (agua, viento, gravedad) y llevados a otros puntos en lo que continúa la acción erosiva. Es decir, tienden a crear las partículas que van a formar el suelo.
- (b) **Química:** Originada por fenómenos de hidratación (por ejemplo, paso de anhidrita o sulfato hemihidratado a yeso o sulfato dihidratado), disolución de sales (por ejemplo, los sulfatos en el agua), oxidación (por ejemplo, minerales de hierro por efecto ambiental), cementación (por ejemplo, agua conteniendo carbonatos previamente disueltos a partir de otra roca), Hidrolisis (reacciones del agua con los minerales, los cuales pueden generar productos solubles y/o insolubles en agua), etc. Las reacciones químicas, por lo tanto, tienden tanto a disgregar como a cementar los

productos formados, dando unión química a las partículas pequeñas que se forman, aunque en la mayor parte de las veces contribuye más a destruir y transformar que a unir.

- (c) **Biológica:** Producida por actividad bacteriana, induciendo putrefacciones de materiales orgánicas y mezclando el producto con otras partículas de origen físico-químico, actuando de elementos catalizador, etc.

Los procesos antes mencionados darán lugar, en un periodo relativamente corto (de 10^2 a 10^3 años), a la generación de una diferenciación vertical que macroscópicamente se distingue como una serie de horizontes más o menos paralelos a la superficie del terreno. En la Figura 1.1 se reporta un perfil de suelo típico, que incluye el desarrollo de las capas A, B y C. En ocasiones, el perfil puede incluir horizontes de materia orgánica (estrato O o H, dependiendo si se encuentran sub-saturados o saturados de H_2O).

Por otra parte, la secuencia de estratos es utilizada para su clasificación, así como para realizar una interpretación sobre su génesis y sus funciones medio ambientales (Nachtergaele *et al.*, 2009). Algunos términos que son de uso común en la edafología (Porto Casanellas, 2003) se presentan a continuación:

- (a) **Espesor de un horizonte:** La dimensión de las capas de un perfil de suelo depende del tipo de roca madre, la disponibilidad de agua, la temperatura y las reacciones biológicas. En el caso del horizonte superior, el espesor está estrechamente relacionado con el crecimiento de las raíces de las plantas y con el rendimiento de los diferentes cultivos, es la distancia comprendida entre horizontes.
- (b) **Profundidad efectiva:** Es la profundidad hasta donde las raíces de las plantas pueden desarrollarse con relativa facilidad, siempre que el agua no sea un factor limitante, también debe indicarse las plantas de referencia.
- (c) **Límites entre horizontes:** El suelo se organiza por horizontes, siendo cada uno de distintas propiedades, teniendo lugar a lo largo de un determinado espesor, esto es lo que define a los límites entre horizontes.
- (d) **Textura:** Las partículas del suelo son de diferentes tamaños. La unión de estas genera diferentes propiedades físicas del suelo, en otras palabras la textura del suelo se define por la combinación de diferente proporción de arena, limo y arcilla.
- (e) **Estructura:** La estructura no es más que la forma de agregarse las partículas individuales del suelo formando unidades de mayor tamaño.
- (f) **Consistencia:** Es una propiedad mecánica del suelo que se debe a las fuerzas de cohesión, adherencia, resistencia a la deformación y a la ruptura del suelo.

(g) **Materia orgánica:** Se refiere al contenido de residuos orgánicos incorporados al suelo, por lo general se la denota por su coloración, aunque para ratificarlo es necesario llevarla a una prueba en laboratorio, se debe describir el estado de la materia orgánica observada.

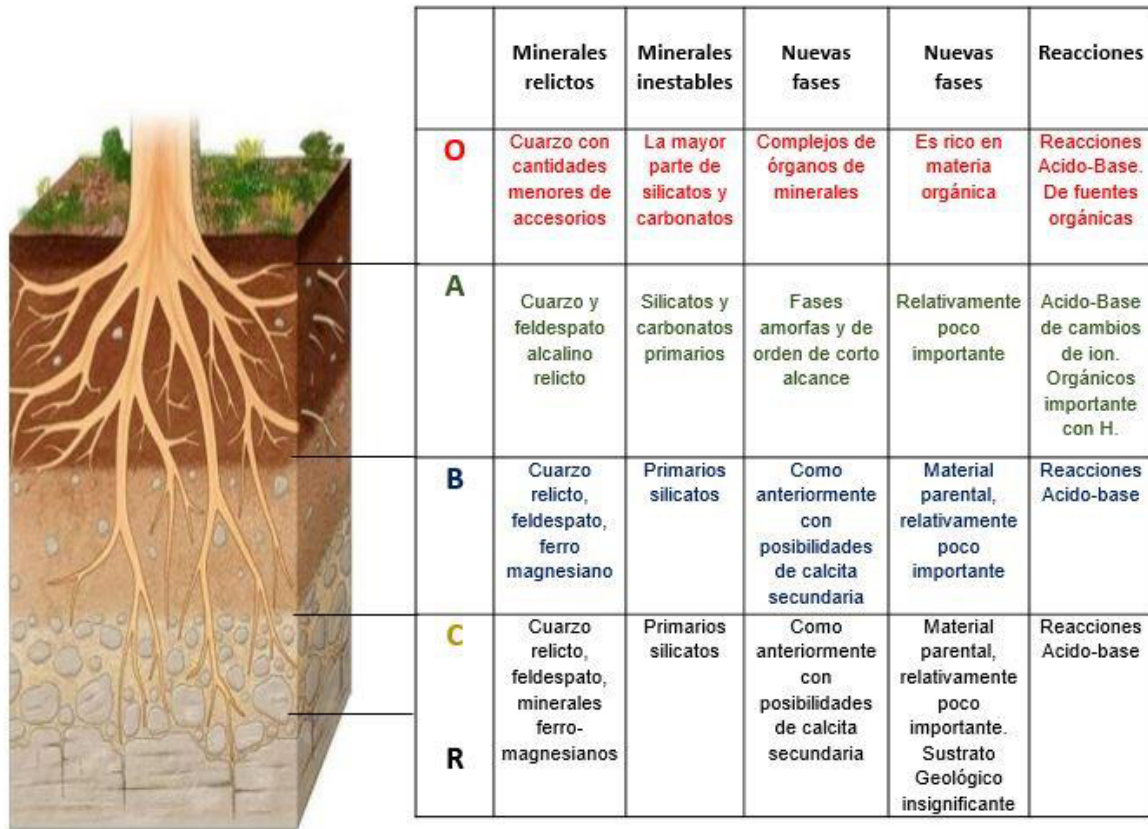


Figura 1.1: Perfil típico de suelo desde el sustrato geológico hasta un horizonte rico en materia orgánica. Se incluye una tabla que describe los componentes orgánicos, minerales inestables, minerales relictos, fases nuevas y las reacciones principales asociadas a cada estrato (FAO, 1998).

1.2 Factores que controlan el desarrollo del suelo

Los factores que controlan el desarrollo de suelo incluyen (Jenny, 1994): (a) material parental, (b) topografía, (c) clima, y (d) los organismos que interactúan o viven en él. A continuación se describe la importancia de cada uno de estos factores.

(a) **Material parental:** En la parte inferior de un perfil de suelo se ubica el denominado horizonte C, que constituye a la roca madre de la cual se va a generar el resto de los estratos. Su identificación es sencilla en regiones frías. Sin embargo, en regiones templadas o tropicales, en donde existe un

proceso de intemperismo más intenso, la identificación es más complicada o no es posible. Polynov (1930) reportó que los materiales parentales pueden clasificarse en tres grupos generales: (a) rocas ígneas y esquistos cristalinos (subdivididas en rocas ácidas, intermedias y básicas), (b) formas de transición (depósitos de productos gruesos de desintegración, arcosas, gravas, depósitos aluviales arenosos, cuarcitas, lutitas y lutitas calcáreas), y (c) rocas sedimentarias (rocas cuarzo-arenosas, carbonatadas y arcillosas).

- (b) **Topografía:** Describe la configuración de la superficie del terreno y es un factor básico en la capacidad de penetración de agua. Un perfil de suelo que tenga un sistema de drenaje, con condiciones que pueden considerarse como representativas del clima regional o local, dependerá de los elementos topográficos, tales como montículos, pendientes y depresiones. Estos elementos gobiernan las condiciones de humedad del suelo.
- (c) **Clima:** Es un factor tan complejo que no puede ser representado por un sólo valor numérico. Se hace necesario trabajar con componentes individuales climáticas, siendo las más importantes la humedad y la temperatura. De esta forma, los valores anuales de precipitación proporcionan un medio para inferir el régimen de humedad de una región, aunque las variaciones estacionales se tienen en cuenta. El patrón de distribución estacional pudiera asumirse también como una variable independiente adicional o factor en la formación de suelo. En la práctica, se ha encontrado que las variaciones menores en las tendencias estacionales son de influencia subordinadas en la formación del suelo. Adicionalmente, se ha prestado especial atención a la magnitud y la frecuencia de las lluvias torrenciales como un factor de erosión del suelo. Los procesos de evaporación y transpiración son fenómenos asociados a la precipitación que alcanza la superficie, regulando la capacidad de filtración a través de un perfil de suelo. La cubierta orgánica del suelo también será un factor a considerar como resultado de una mayor capacidad de retención de la humedad.
- (d) **Organismos:** En la evolución del sistema suelo también se tiene que considerar la presencia de diversos tipos de macro y micro – organismos, los cuales ocurren y se desarrollan en los diversos estratos, especialmente los de tipo orgánico. Diversas reacciones bioquímicas influyen en el tipo de compuestos orgánicos que aparecen en esta capa.

1.3 Metodología de análisis de suelo en México

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2000) propuso una metodología, dividida en etapas, a fin de documentar la información referente a los diferentes tipos de suelos que ocurren en la República Mexicana. Este procedimiento parte del levantamiento y análisis de perfiles de suelos, el análisis fisicoquímico de los estratos, y la documentación en base de datos y cartas edafológicas. A continuación se describen, de forma general, las etapas que constituyen dicha metodología.

- (a) **Etapas de registro y preparación (Figura 1.2):** Consiste en ordenar y controlar las muestras de suelo, así como organizar la información recopilada en campo, entregada por los responsables del muestreo.

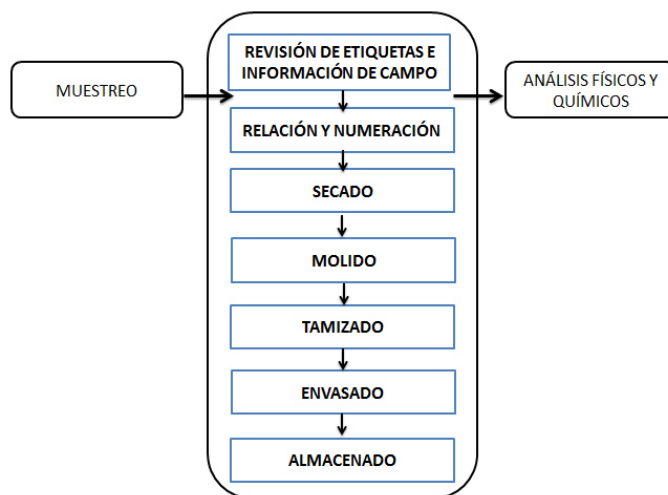


Figura 1.2: Diagrama de flujo de la etapa de registro y preparación (INEGI, 2000).

- (b) **Etapas de análisis físicos y químicos (Figura 1.3):** Es la etapa más importante en el laboratorio ya que, de sus resultados, dependerá la correlación con la hipótesis planteada por los especialistas edafólogos en etapas previas del trabajo cartográfico.

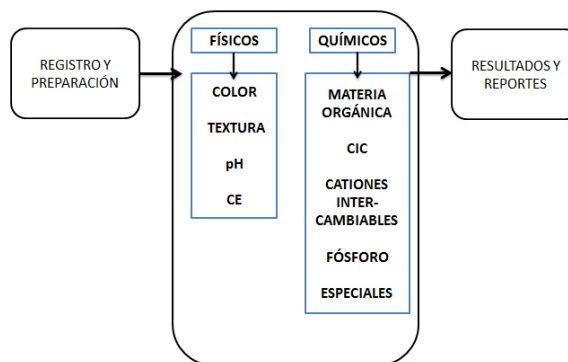


Figura 1.3: Diagrama de flujo de la etapa de análisis físicos y químicos (INEGI, 2000).

- (c) **Etapa de integración de resultados y reportes (Figura 1.4):** Los datos obtenidos a partir de los análisis, son integrados en los reportes elaborados para tal efecto y entregados al área responsable del trabajo cartográfico, para su aplicación en la validación cartográfica.

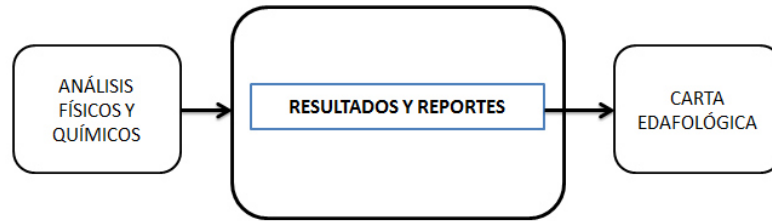


Figura 1.4: Diagrama de flujo de la etapa de resultados y reportes (INEGI, 2000).

- (d) **Etapa de generación de archivos (Figura 1.5):** Consiste en incorporar la información existente a formato digital, la cual pasará a formar parte de la base de datos general, con el fin de que sirva como complemento y sustento de la cartografía edafológica que produce el instituto.

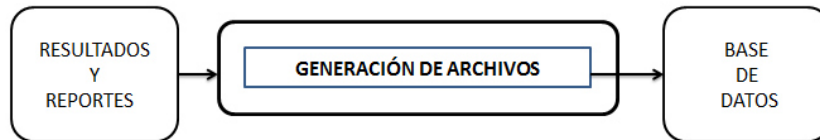


Figura 1.5: Diagrama de flujo de la etapa de generación de archivos (INEGI, 2000).

1.4 Clasificación de suelos

Actualmente, existen dos esquemas de clasificación de suelo que son utilizadas mundialmente: (a) la denominada *Soil Taxonomy*, la cual fue propuesta por el Departamento de Agricultura de los EEUU (Soil Survey Staff, 1975; Blockheim *et al.*, 2014) y (b) la clasificación propuesta por la FAO / UNESCO (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

El esquema *Soil Taxonomy* aplica un modelo jerárquico que agrupa a suelos similares dentro de categorías generales considerando el concepto de “horizonte diagnóstico”. Este sería un estrato definido morfométricamente y que está siempre presente en todos los perfiles de un tipo de suelo. Estos estratos se complementan con diversas propiedades diagnósticas: (a) cantidad de materia orgánica y minerales, (b)

proporción de humedad, (c) tipo de minerales, (d) roca madre, (e) condiciones climáticas. La aplicación de este sistema se ha extendido a América Latina. De esta forma, cada suelo es ubicado siguiendo la secuencia Orden – Suborden – Grandes grupos – Subgrupo – Familia – Serie. En la Tabla 1.1 se presenta una descripción de los Órdenes en este esquema.

El esquema de la *FAO / UNESCO* (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007) es una variante del sistema *Soil Taxonomy*, ya que existen diferencias en algunos tipos de horizontes y propiedades diagnósticas. Por ejemplo, en la clasificación *FAO / UNESCO* no se utilizan algunos términos populares que se prestan a confusión, tal como “suelos áridos”, “suelos pardos”, etc. Además, se evitan características no claras, como usar “suelo con alta contenido de materia orgánica” en lugar de “suelo con 10-20% de materia orgánica”. Adicionalmente, se evita la referencia a régimen de humedad o temperatura, que es algo común en la clasificación americana. El proceso de clasificación presenta tres etapas: (a) Se identifican las características, el espesor y la profundidad de las capas, buscando ubicar los horizontes diagnóstico, (b) la combinación de horizontes descrita en campo se compara con aquellos que caracterizan a los denominados Grupos de Suelo de Referencia (GSR), y (c) se identifican calificadores I, típicamente asociados con un GSR, y II, que son aquellos integrado hacia otros GSR. En la Tabla 1.2 se reportan los GSR de la clasificación *FAO / UNESCO* y las características básicas que los distinguen.

1.5 Estudios de suelo en la región Noreste de México

El INEGI (2000) reportó la distribución de tipos de suelo para México en función de los tipos de vegetación. En el caso de matorrales y bosques, que dominan la vegetación en la región central de Nuevo León, los suelos dominantes son de tipo leptosol, regosol y calcisol.

Por otra parte, en la literatura se ha documentado varios trabajos relacionados a la cubierta de suelo en la región Noreste de México. Estos estudios han estado orientados principalmente a: (a) procesos de pérdida de vegetación por sobrepastoreo (Manzano y Navar, 2000), (b) erosión de suelo por cambio de uso hacia agricultura (Navar y Synnott, 2000; Návar-Chaidez, 2008; Jiménez-Pérez et al., 2009), (c) como soporte en el desarrollo de especies vegetales (Estrada-Castillón et al., 2004; Alanís-Rodríguez, 2006; Rodríguez-Laguna et al., 2009; Pando-Moreno et al., 2014) y animales (Hernández-Gómez et al., 2012); (d) procesos de contaminación de vegetación (Rodríguez-Ortiz et al., 2006).

Tabla 1.1 Descripción general de los Órdenes que conforman el esquema de clasificación *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 1975; Blockheim et al., 2014).

Orden	Descripción
Podsol	Suelo asociado a climas fríos o templados fríos, con abundante precipitación. Se forma a partir de materiales parentales asociados a cenizas volcánicas y a materiales arenosos. Presenta una vegetación arbórea. El horizonte B presenta tonalidades rojizas, ya que acumula una gran cantidad de óxido de fierro. Debido a un ambiente frío, la degradación de la materia orgánica es lenta, lo que da lugar a la formación de un horizonte gris de humus ácido, mezclado con granos de arcilla.
Entisol	Este suelo tiene una estructura de regolito. Por tanto, tiene menos del 30% de fragmentos rocosos. Se forma típicamente tras aluviones y no presenta "horizontes diagnósticos". El cambio de color entre horizonte A y C es casi imperceptible. Son pobres en materia orgánica y, en general, responden a abonos nitrogenados. La mayoría de los suelos que se generan desde sedimentos no consolidados, en su etapa inicial, fueron entisoles. En ciertas regiones se conocen también como Rudosol o Tenosol.
Oxisol	Estos suelos contienen, en todos los horizontes que lo conforman, no más del 10% de minerales meteorizables y menos del 10% de saturación de bases. Siempre presentan un color rojo o amarillo, debido a una alta concentración de Fe^{+3} , así como de óxidos e hidróxidos de aluminio. Se forman sobre antiguos suelos de trópicos húmedos. Tienden a presentar texturas finas, debido a su alto grado de evolución y a la relación del mismo con el tamaño de las partículas. Son de escasa fertilidad.
Alfisol	Son suelos de regiones húmedas, por lo que se encuentran húmedos la mayor parte del año. Son suelos jóvenes, comúnmente aparecen bajo bosques de hoja caediza. Mantienen reservas notables de minerales primarios, arcillas, etc, los cuales han permanecido estables, esto es, libres de erosión y de otras perturbaciones edáficas.
Ultisol	Se definen como suelos minerales que no contienen material calcáreo y con menos de 10% de minerales resistentes a la intemperie en su capa superior. Presentan vegetación arbórea. Su color de suelo es pardo rojizo oscuro. Presentan menos de 35% de base de saturación. Se producen generalmente en regiones húmedas templadas o tropicales.
Molisol	Son suelos que se desarrollan en climas templados, húmedos y semiáridos. Se caracterizan por un horizonte de superficie con color oscuro. Representan uno de los suelos agrícolas más importantes y productivos del mundo (zona con pastizales), ya que tienen alta fertilidad, tiene una cubierta vegetal integrada principalmente por gramíneas. Este horizonte superficial fértil es conocido como un epipedón mólico. Se desarrolla como resultado de la adición continua y a largo plazo de materiales orgánicos derivados de raíces de las plantas.
Inceptisol	Son suelos relativamente nuevos y se caracterizan por tener horizontes poco desarrollados. Están asociados a baja temperatura, presentándose en climas húmedos (fríos y cálidos). Muestran un alto contenido de materia orgánica. Estos suelos dan alguna indicación de acumulación de arcillas, óxidos metálicos o humus en las capas.
Gelisol	Este tipo de suelo está asociado a climas muy fríos, la mayoría contiene una capa de color negro o marrón oscuro, seguida de una capa mineral superficial. No son muy fértiles, ya que los nutrientes calcio y potasio son muy fáciles de ser lixiviados. También se conocen como Criosol.
Vertisol	Son generalmente de color negro, lo cual se asocia a un alto contenido de arcilla expansiva montmorillonita. En las estaciones secas, estos suelos forman grietas de 1 cm de ancho. Ocupan las partes bajas del relieve, mostrando una fuerte expansión al humedecerse y una contracción al secarse. Generalmente, se ubican en regiones entre los 50° N y 45° S del ecuador terrestre. Entre las áreas donde dominan se incluyen el sur de Texas y norte de México, el norte de Nigeria, Tracia, y partes del este de China. En su estado climático natural, los vertisoles están cubiertos de pastos o bosques pastizados.
Aridisol	Se encuentran en climas áridos y semiáridos. Las bajas precipitaciones producen que sean suelos poco lixiviados, pobres en materia orgánica. Incluyen un horizonte cálcico generado por iluviación y ocupan cerca de un tercio de la superficie terrestre. Ya que tienen una muy baja concentración de materia orgánica, la deficiencia del agua es la principal característica que los define. Los horizontes pueden ser cementados por carbonatos, yeso o sílice, por lo que su color es claro.
Andisol	Son suelos que se desarrollan en depósitos volcánicos (ceniza volcánica, piedra pómez, carbonillas y lava). Se desarrollan en regiones subhúmedas y húmedas, poseen acumulación de humus. Se caracterizan por su mineralogía, en la que se encuentran minerales de poco ordenamiento cristalino (amorfo), como la imogolita y el alofano. Estos suelos se meteorizan rápidamente, formando mezclas amorfas de aluminio y silicatos.
Histosol	Es un tipo de suelo caracterizado por ser fuertemente orgánico, incluso turboso. Se desarrolla en ambientes de condiciones húmedas o frías. Se encuentra saturado en agua al menos una vez al año. Su material original consta de material vegetal poco descompuesto, mezclado con cantidades variables de material terroso, por lo que es muy liviano.

Tabla 1.2 Descripción general de los Órdenes y Características que conforman el esquema de clasificación, FAO-UNESCO (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

Orden	Características
Histosol	Suelos con gruesas capas de materia orgánica
Antrosol Tecnosol	Suelos con fuerte influencia humana Suelos con uso agrícola prolongado e intensivo Suelos que contienen muchos artefactos
Criosol Leptosol	Suelos con enraizamiento limitado debido a permafrost o rocosidad somera Suelos afectados por hielo Suelos muy delgados (espesor <30 cm) sobre una roca extremadamente dura
Vertisol Fluvisol Solonetz Solonchaks Gleysol	Suelos influenciados por agua Condiciones alternadas de saturación-sequia, ricos en arcillas expandibles Planicies de inundación, marismas costeras Suelos alcalinos Enriquecimiento en sales por evaporación Suelos afectados por agua subterránea
Andosol Podzol Plintisol Nitisol Ferralsol	Suelos regulados por la química de Fe/Al Alofano o complejos Al-humus Queluviación y quiluviación Acumulación de Fe bajo condiciones hidromórficas Arcilla de baja actividad, fijación de P, fuertemente estructurado Dominancia de caolinita y sesquióxidos
Planosol Stagnosol	Suelos con agua estancada Discontinuidad textural abrupta Discontinuidad estructural o moderadamente textural
Chenozem Kastanozem Phaeozem	Acumulación de materia orgánica, alta saturación con bases Típicamente mólico Transición a clima más seco Transición a climas más húmedos
Gipsisol Durisol Calcisol	Acumulación de sales menos solubles o sustancias no salinas Yeso Sílice Suelos con alto contenido de Carbonatos de Calcio (CaCO_3), en ocasiones denominadas como rendzina.
Albeluvisol Alisol Acrisol Luvisol Lixsol	Suelos con subsuelo enriquecido en arcilla Leguas albelúvicas Baja saturación con bases, arcillas de alta actividad Baja saturación con bases, arcillas de baja actividad Alta saturación con bases, arcilla de alta actividad Alta saturación con bases, arcilla de baja actividad
Umbrisol Arenosol Cambiosol Regosol	Suelos relativamente jóvenes o suelos con poco o ningún desarrollo de perfil Con suelo superficial obscuro ácido Suelos arenosos Suelos moderadamente desarrollados Suelos en formación a partir de material consolidado sin desarrollo significativo de perfil

Sin embargo, de momento no existen para la región central de Nuevo León trabajos relacionados al estudio específico del desarrollo del suelo, en donde se consideren las variaciones en mineralogía y química

desde la roca madre hasta el último estrato del perfil. El presente trabajo tuvo como propósito iniciar con este tipo de investigación en la región de estudio.

1.6 Objetivo

Considerando lo expuesto anteriormente, en el presente estudio se ha planteado el caracterizar mineralógica y químicamente perfiles de suelos típicos entre Linares – La Ascensión, Nuevo León, con el objetivo de estudiar la generación del suelo y evaluar el proceso de movilidad de elementos mayores y traza en el sistema roca-suelo-vegetación.

1.7 Hipótesis de Trabajo

De esta forma, se estableció partir de la idea de que el proceso de evolución del sistema roca-suelo-vegetación puede ser evaluado a partir del análisis de información mineralógica y química de roca, estratos edáficos y la raíz de la vegetación.

1.8 Metodología general

A fin de cumplir con los objetivos antes mencionados, se desarrollaron los siguientes bloques de actividades:

1.8.1 Preparación previa:

- Recopilación bibliográfica de trabajos previos sobre el marco climático, geológico y Forestal de las localidades bajo estudio.
- Revisión de documentos relacionados a la edafología para el área de estudio.

1.8.2 Trabajo de campo:

- Levantamiento de perfiles edafológicos en el transecto Linares – La Ascensión, dentro de la Sierra Madre Oriental.
- Recolección de muestras de la roca madre y los horizontes que conforman el perfil de suelo.

1.8.3 Experimental:

- Preparación de muestras (roca madre: molienda; suelos: secado, tamizado e incineración a 600°C; vegetación: secado e incineración a 600°C).
- Elaboración de láminas delgadas para roca madre y análisis petrográfico.
- Análisis edafológicos clásicos para muestras de suelo.

- Análisis mineralógico por difracción de rayos-X para muestras de roca y suelo.
- Análisis químico de elementos traza por espectrometría de masas acoplada a plasma por inducción (ICP-MS) para muestras de roca, suelo y vegetación.

1.8.4 Elaboración y análisis de bases de datos:

- Compilación de los datos edafológicos, mineralógicos y químicos, para cada horizonte que conforma un perfil de suelo, en una base de datos de formato *STATISTICA for WINDOWS 7.1*.
- Considerando el marco climático-geológico-forestal y el análisis de la información generada en el presente estudio, proponer un modelo conceptual sobre el desarrollo de cada perfil de suelo, que explique los cambios observados en mineralogía y química.

Una descripción más detallada del esquema de trabajo de campo, laboratorio, compilación de datos y el análisis de los mismos se presenta en el capítulo de Metodología.

2. MARCO CLIMÁTICO, GEOLÓGICO Y FORESTAL

2.1 Ubicación y clima

El área de estudio se distribuye entre las regiones fisiográficas Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo Norte (Figura 2.1). La Sierra Madre Oriental se define como una cadena montañosa con una longitud de ~1350 km, que se extiende desde el sur del Río Bravo en forma paralela al Golfo de México hasta unirse con el Eje Neovolcánico Transmexicano. Se han reportado al Cerro San Rafael (3751 msnm), ubicado en Coahuila, y el Cerro del Potosí (3700 msnm), localizado en Nuevo León, como las mayores elevaciones en la Sierra Madre Oriental. La variación topográfica observada en la región da como resultado diferencias de temperatura. Mientras que en los puntos más elevados el clima es frío (llegando en invierno a los -2°C y en verano los 20°C como promedio), en los valles predominan los climas templados o cálidos (en invierno 10°C promedio, alcanzando los 40°C en verano).



Figura 2.1: Regiones Fisiográficas de México (Información obtenida de la fuente electrónica: http://www.conevyt.org.mx/cursos/cursos/pcn/antologia/cnant_4_11.html; acceso el 22.01.16)

Por otra parte, la Llanura Costera del Golfo Norte se extiende entre la Sierra Madre Oriental y el Golfo de México y desde el río Bravo hasta el Eje Neovolcánico Transmexicano. La región se caracteriza por mostrar una variación de 200 m en desnivel entre el contacto con la sierra y la costa. La llanura se ha dividido en dos áreas, que son delimitadas por el río Tamesí. La parte norte, en Tamaulipas, corresponde a tierras bajas, arenosas y pantanosas, que presentan un clima seco con precipitaciones <500 mm y una temperatura anual promedio de ~18°C. Estas zonas bajas son interrumpidas por algunas sierras aisladas, tal como la Sierra de San Carlos y la Sierra de Tamaulipas. El área sur cubre la zona angosta conocida como la

Huasteca (que se distribuye entre los estados de Tamaulipas, Veracruz, San Luis Potosí, Hidalgo y Puebla), la cual es atravesada por diversos ríos que bajan desde la Sierra Madre Oriental. La Huasteca, que muestra un clima templado a cálido subhúmedo (precipitación = 600-1000 mm; temperatura promedio anual ~22°C), presenta una gran fertilidad agrícola.

2.2 Geología

El rasgo geológico más importante en la región es la denominada Sierra Madre Oriental (SMOr), que se ha definido como un macizo montañoso rugoso, angosto y alargado, situado en el oriente de la República Mexicana, que emerge hacia el W de la Planicie Costera del Golfo de México, con cumbres que alcanzan los 3,000 m sobre el nivel del mar, las cuales luego descienden de altura hacia el W y pasan a un extenso altiplano situado en el centro del país (Figura 2.2; Goldhammer, 1999; Eguiluz de Antuñano et al., 2000).

La SMOr presenta una orientación general NNW-SSE, con aproximadamente 1,350 km de longitud y de 80 a 100 km de ancho que se extiende desde el sur del Río Bravo y corre paralela al Golfo de México hasta unirse con el Eje Neovolcánico Transmexicano. Sin embargo, a la altura de Monterrey, N.L. y Saltillo, Coah, La dirección de la SMOr cambia en un sentido E–W. Este cambio representa el rasgo fisiográfico más importante de la cadena y se le ha denominado como “*Curvatura de Monterrey*” (Figuras 2.3-2.4; Chávez Cabello et al., 2011). La mayor parte de las rocas que constituyen a la SMOr son carbonatos y lutitas, aunque también ocurren areniscas y rocas evaporíticas, que cubren del Jurásico medio al Cretácico Superior y que fueron depositadas sobre un basamento ígneo y metamórfico precámbrico. Esta secuencia sedimentaria fue deformada y cabalgada desde fines del Cretácico y principalmente durante los primeros periodos de la era cenozoica, aunque el sistema de montañas no es continuo porque factores tectónicos y de erosión han influido en ello. La comprensión geológica de la SMOr implica la revisión de su evolución tectónica y la descripción de su estratigrafía, las cuales se describen a continuación.

2.3 Evolución tectónica del Noreste de México

En el modelo tectónico del N de México, propuesto por Goldhammer y Johnson (2001), se reporta un esquema para las llamadas Provincia Occidental del Pacífico y la Provincia Oriental del Golfo de México, siendo esta última la que incluye el NE de México. Este modelo fue dividido en cinco etapas principales (Figura 2.5): (a) Paleozoico Tardío o de la “Reconstrucción de Pangea”, (b) Triásico Tardío–Jurásico Medio o de la “Ruptura Continental (Rift)”, (c) Jurásico Tardío o de la “Deriva”, (d) Cretácico Inferior o de “Enfriamiento de la Corteza” y (e) Cretácico Tardío–Paleoceno, “Deformación Laramídica”.

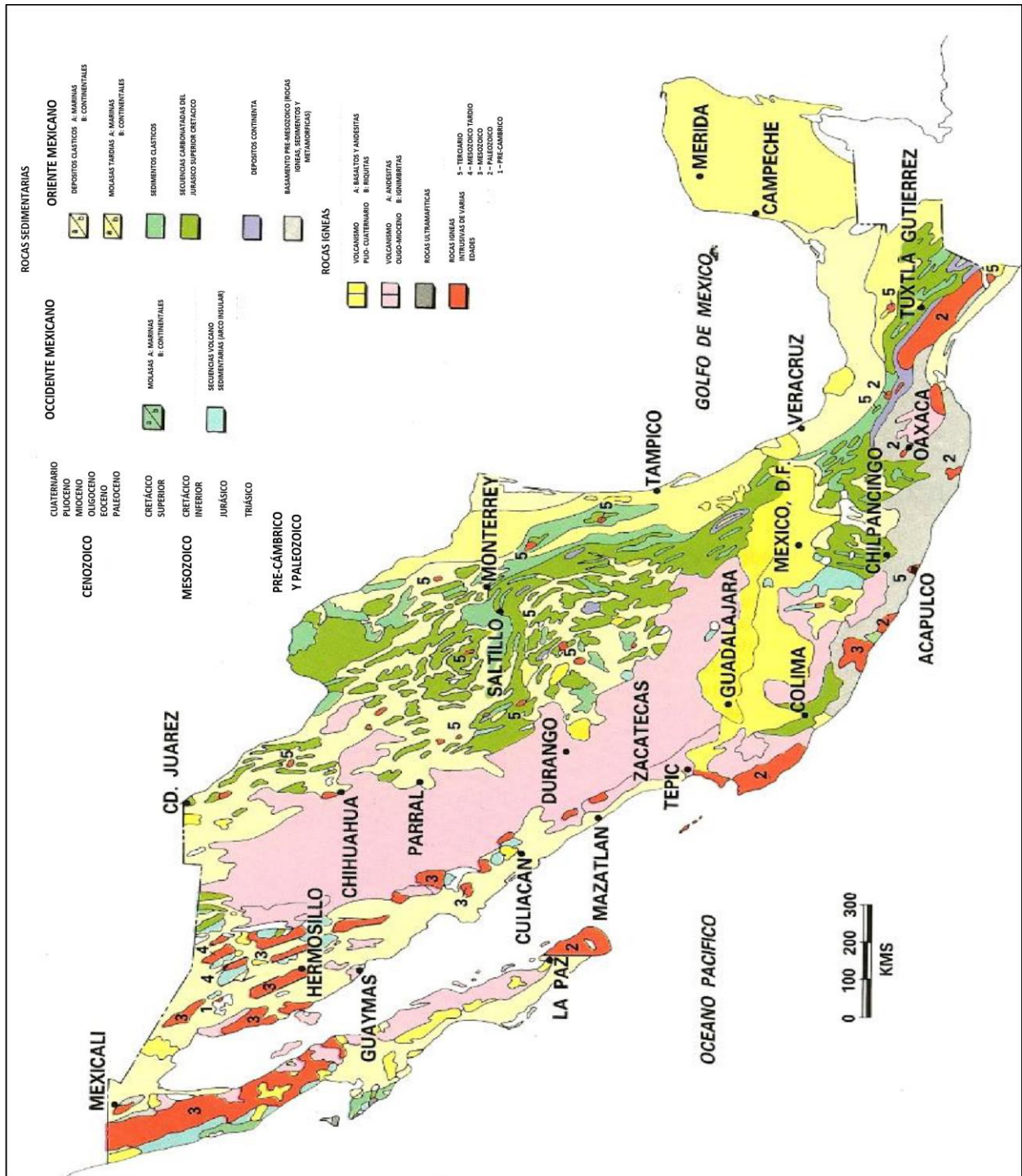


Figura 2.2: Mapa geológico general de México (Santiago et al., 1984)

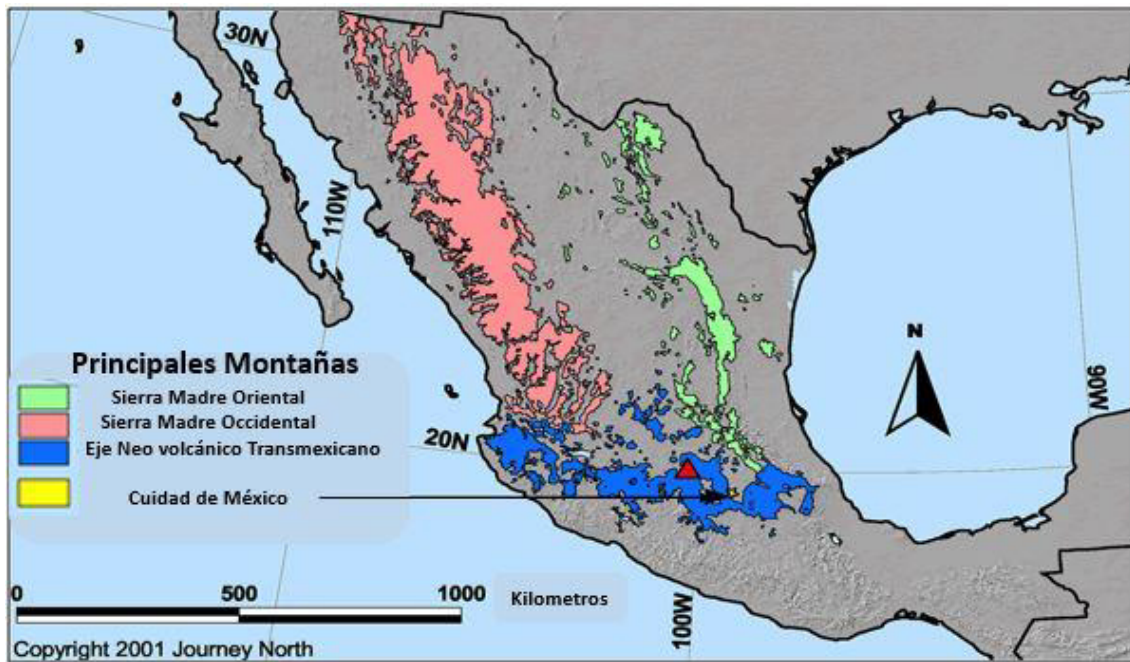


Figura 2.3: Principales sistemas montañosos en México: Sierra Madre Oriental (en color verde), Sierra Madre Occidental (en color salmón) y Eje Neovolcánico Transmexicano (en color azul).

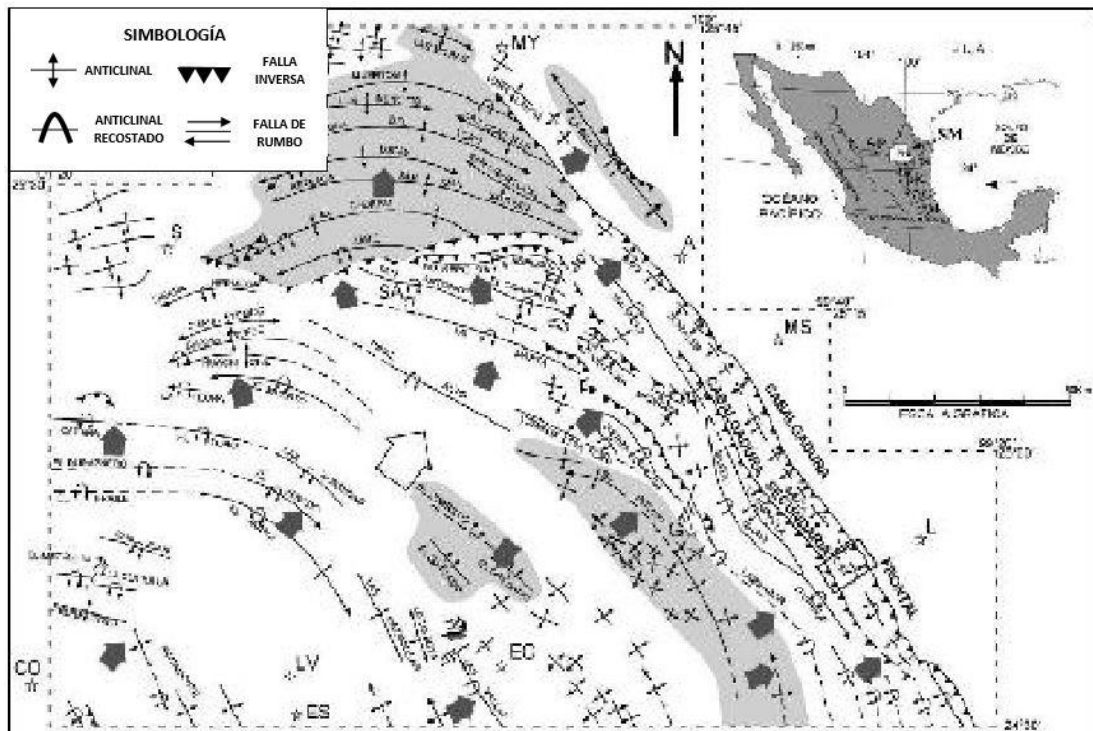


Figura 2.4: Mapa geológico-estructural de la Curvatura de Monterrey. MY = Monterrey, S = Saltillo, A = Allende, SA = San Antonio de las Alazanas, MS = Montemorelos, L = Linares, G = Galeana, EC = El Carmen, LV = La Ventura, CO = Concepción del Oro, ES = El Salvador (Chávez Cabello et al., 2011).

(a) Etapa 1: Paleozoico Tardío, “Reconstrucción de Pangea”.

Durante el Carbonífero–Pérmico (Figura 2.5A), las masas continentales de Gondwana y Laurasia colisionaron, dando como resultado el supercontinente Pangea. Este fenómeno generó una gran sutura conocida como Cinturón Ouachita–Marathon (Sedlock et al., 1993). Esta sutura, asociada a una antigua zona de subducción, dio inicio a un arco magmático en la porción de Sudamérica y posteriormente a una colisión continental. La zona de sutura se extiende hasta Coahuila y parte de Chihuahua (Ortega Gutiérrez et al., 1994). Se ha reportado que el basamento formado presentaba un espesor de ~35 km. Por otra parte, el futuro Bloque de Yucatán o Terreno Maya se ubicaba al S del Cinturón Ouachita–Marathon, junto a lo que actualmente es Texas y Luisiana (Goldhammer, 1999).

(b) Etapa 2: Triásico Tardío–Jurásico Medio, Ruptura Continental o rift.

En este periodo se iniciaron procesos de fragmentación continental en Pangea. Al E del bloque de Coahuila, una rotación anti-horaria del bloque de Yucatán fuera del Golfo de México resultó en el desarrollo de una fase de *rift* en la evolución tectónica del NE de México (Figura 2.5B). Esta etapa de deformación extensional o de *rift* tuvo una duración de ~50 Ma (Triásico Tardío–Jurásico Medio; Goldhammer Y Johnson, 2001).

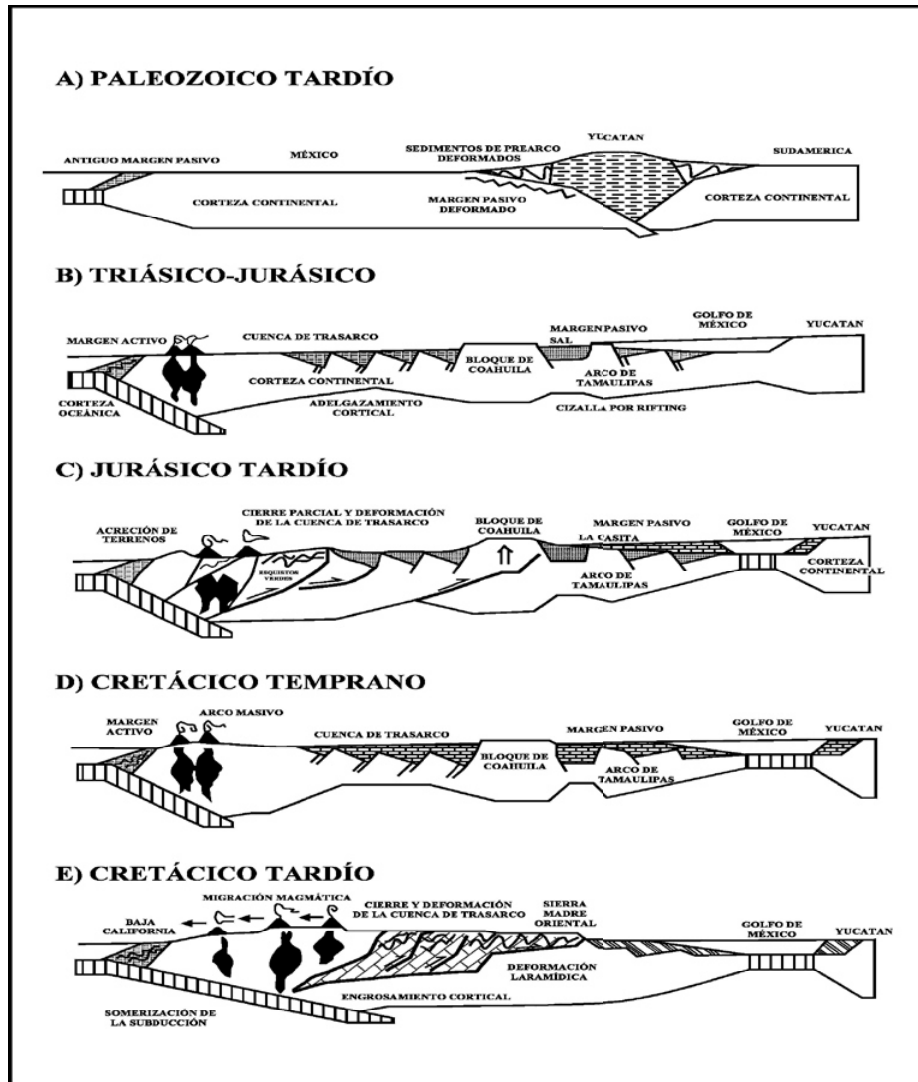


Figura 2.5: Modelo tectónico de la evolución de las provincias occidental del Pacífico y oriental del Golfo de México entre el Paleozoico Tardío–Cretácico Tardío (Goldhammer y Johnson, 2001). Esta sección esquemática tiene una orientación aproximada E-W (de izquierda a derecha) a través del N de México.

El basamento del NE de México fue levantado, generándose algunos altos estructurales (Bloque de Coahuila, Bloque de La Mula, Bloque Burro–Peyotes–Salado y Archipiélago de Tamaulipas) y algunas depresiones (Cuencas de Sabinas, Maverick, Mexicana y Magiscatzin; Canales de Monterrey y Chihuahua). La combinación de los altos estructurales y las cuencas dieron lugar a un sistema de *grabens* y *horsts*, los cuales controlaron la depositación mesozoica en las diferentes depresiones sedimentarias (Padilla Y Sánchez, 1986; Goldhammer, 1999).

Durante la etapa de deformación extensional (Jurásico Medio) se desarrollaron depósitos continentales, que representan una posible evidencia de los procesos de *rift*. La subsidencia tectónica del basamento se caracterizó por una rápida fase inicial distensiva. Este evento se desarrolló durante el Triásico Tardío-Liásico, seguido por un levantamiento del basamento durante el Liásico-Calloviano Inferior (Goldhammer, 1999). Durante ésta etapa se formó una cuenca que, debido a la subsidencia que dominó el desarrollo en la región, recibió la entrada de agua marina somera. Esto propició la formación de potentes depósitos de sedimentos evaporíticos.

En este periodo, debido al ingreso de agua marina en la región, la formación de depósitos continentales y de tipo evaporítico cesó (Figura 2.5C), proceso que fue controlado por la deriva del Bloque de Yucatán. Este evento se asocia, en general, al desarrollo de piso oceánico en el Golfo de México y que provocó la separación de Sudamérica con respecto a Norteamérica (Sedlock et al., 1993; Goldhammer, 1999).

Mientras transcurría la expansión del Golfo de México durante el Oxfordiano, el Bloque de Yucatán se desplazó al S, a favor de la falla Tamaulipas–Chiapas (tipo transformante derecha; Pindell, 1985). Cuando ésta falla se volvió inactiva, el Archipiélago de Tamaulipas fue cubierto por carbonatos durante el Jurásico Superior. La expansión máxima del Golfo de México finalizó durante el Berriasiano (Padilla y Sánchez, 1986; Goldhammer, 1999). Posteriormente, se inició el desarrollo de una nueva dorsal oceánica al sur del Bloque de Yucatán, dentro del proto-Caribe (Sedlock et al., 1993).

(c) Etapa 3: Jurásico Tardío, “La Deriva”.

Una subsidencia tectónica ocurrió de forma paulatina y asociada con etapas de *rift* y deriva. En este periodo se desarrollaron diferentes facies de depositación, como una función de la posición de las fuentes de materiales clásticos, que corresponden a los márgenes de los altos estructurales. De esta forma, en las zonas costeras de los Bloques de Coahuila y Burro Peyotes, así como del Arco de Tamaulipas, se depositaron materiales predominantemente arenosos. Por otra parte, en las áreas alejadas a las zonas continentales, se acumularon sedimentos arcillosos finos y carbonatos de aguas profundas en diferentes facies sedimentarias, dependiendo del paleo-relieve (Padilla Y Sánchez, 1986; Goldhammer, 1999).

(d) Etapa 4: Cretácico Temprano, “Enfriamiento Cortical”.

Este periodo se caracterizó por presentar un reposo de la corteza (Figura 2.5D), sin procesos de subsidencia o movimientos de falla. Sin embargo, en el margen N del Bloque de Coahuila se reactivó la Falla de San Marcos (Padilla Y Sánchez, 1986; Goldhammer, 1999). El cese de los movimientos de esta falla resultó en el desarrollo de grandes plataformas marinas en la región, las cuales constituyen a las formaciones calcáreas del Cretácico Inferior. El Bloque de Coahuila continuó como un alto estructural y que controló la distribución y patrones de progradación de las facies carbonatadas, sin aportar siliciclastos a la cuenca. Durante el Aptiano, se registró un cambio tectónico a nivel regional, el cual dio lugar al depósito de sedimentos clásticos.

Durante el Cretácico (Albiano-Cenomaniano), la subsidencia continuó y, debido a esta, se incrementó la profundidad de la cuenca. Este cambio provocó una variación en la depositación de sedimentos: de carbonatados de plataforma profunda a depósitos turbidíticos. Por otra parte, el resto del margen occidental fue transgredido (Isla de Coahuila), predominando en él facies de mar abierto, donde se depositó una gran cantidad de carbonatos finos y lodos calcáreos. El levantamiento regional continuó a través del Cretácico-Superior (Cenomaniano-Turoniano), predominando un ambiente marino donde se depositaron sedimentos arcillo-calcáreos, en algunos casos con una gran cantidad de materia orgánica (Padilla Y Sánchez, 1986). Posteriormente, en el Cretácico Superior (Conaciano-Santoniano) continuaron las condiciones regresivas, por lo que la cuenca se caracterizó por el depósito de una secuencia calcáreo-arcillosa, con intercalaciones de sedimentos calcáreos finos. La parte terminal del Cretácico se caracterizó por condiciones de mar abierto y aguas profundas, que dieron como resultado la acumulación de sedimentos calcáreo arcillosos (Padilla y Sánchez, 1986).

(e) Etapa 5: Cretácico Superior-Paleoceno, “Deformación Laramídica”.

Durante esta etapa (80-55 Ma; Figura 2.5E) se presentó el evento tectónico denominado como Orogenia Laramide, el cual dio como resultado la deformación de la cubierta sedimentaria mesozoica del NE de México, originando el Cinturón Plegado y Cabalgado de la SMO (Padilla Y Sánchez, 1986; Sedlock et al., 1993; Goldhammer, 1999; Eguiluz de Antuñano et al., 2000; English Y Johnston, 2004). Esta se ha identificado como un evento de deformación de montañas contemporáneo a la acumulación de sedimentos de la Formación Laramide (Wyoming, EEUU). Este evento tectónico generó, en el Cretácico Tardío-Terciario Temprano, cadenas de montañas formadas por estructuras que involucran deformación del basamento dentro del antepaís de las Montañas Rocallosas y cuencas con depósitos clásticos del Paleoceno-Eoceno, que incluye las serranías de Montana, Wyoming, Utah, Colorado, Nuevo México y Arizona.

Los efectos del evento laramídico se extendieron hacia México (Chávez Cabello et al., 2011), generando los cinturones plegados de Chihuahua, Coahuila y la SMO en el N de México, mientras que en el S las Sierras de Chiapas, Zongolica y de Juárez. Es importante señalar que la deformación laramídica en México muestra relaciones más complejas con respecto a lo observado en EEUU. Esto se ha interpretado como resultado del despegue sedimentario sobre una secuencia evaporítica, la incorporación local del basamento en la deformación y la reactivación de algunas fallas antiguas del basamento, como la de San Marcos (Padilla Y Sánchez, 1986; Chávez-Cabello et al., 2011).

Algunos autores han reportado que la Orogenia Laramide ocurrió posterior a la acreción de terrenos, durante el Jurásico y el final del Cretácico Temprano y que dio lugar al levantamiento de la Cordillera Norteamericana. Por esta razón, English y Johnston (2004), sugirieron que el evento laramídico no tuvo un origen colisional y señalaron que otros mecanismos podrían ser los responsables del levantamiento y la deformación laramídica: (a) cabalgamiento de retroarco (*retroarc thrusting*), (b) tectónica de tipo “orogenia flotante” (*“orogenic float” tectonics*), (c) subducción plana (*flat-slab subduction*), y (d) colisión transpresional cordillerana (*Cordilleran transpressional collision*). Sin embargo, English Y Johnston (2004) señalaron que ninguno de estos mecanismos explica de forma satisfactoria la geometría, el intervalo de tiempo o la extensión del evento laramídico.

2.4 Estratigrafía de la Sierra Madre Oriental

La SMO está constituida litológicamente por una secuencia de rocas carbonatadas y terrígenas de edad mesozoica (Michalzik, 1986), las cuales fueron depositadas sobre un basamento cristalino de edad greenvilliana (Figura 2.6; Goldhammer, 1999; Eguiluz de Antuñano et al., 2000). Esta litología sedimentaria ha sido separada en dos paquetes principales. El primer paquete incluye una secuencia del Triásico Tardío-Cretácico Temprano, que incluye principalmente lechos rojos, rocas volcanoclásticas, evaporitas, rocas siliciclásticas y carbonatos marinos, los cuáles se depositaron en una cuenca (margen pasivo) producto de un evento de *rift* y deriva (Goldhammer, 1999). Esta secuencia se inicia con el Grupo Huizachal (Triásico-Calloviano), constituido por intercalaciones de arenisca, lutita, conglomerado polimíctico y roca volcaniclástica. Esta secuencia se considera la más joven del basamento en la región.

A esta unidad le sobreyacen tres unidades del Jurásico: (a) Fm. Minas Viejas (Calloviano - Oxfordiano), conformada por rocas evaporíticas, (b) Fm. Zuloaga (Oxfordiano), constituida por caliza con nódulos de pedernal, y (c) Fm. La Casita (Tithoniano-Kimmeridgiano), constituida por lutita, interestratificada con caliza arcillosa, arenisca calcárea y horizontes fosfatados. La secuencia continúa hasta el Cretácico, con las siguientes unidades: (a) Fm. Taraises (Berriasiano-Huateriviano), constituida por caliza que en su parte superior muestra una secuencia siliciclástica de arenisca y lutita, (b) una secuencia de caliza masiva que,

dependiendo de su facies, se denomina Fm. Tamaulipas Inferior, la cual se depositó en un ambiente de cuenca, o Fm. Cupido, que muestra características de plataforma arrecifal (Hauteriviano-Aptiano), (c) Fm. La Peña (Aptiano), conformada por una secuencia de estratos lutíticos de espesor pequeño, (d) Una secuencia de caliza de espesor mediano, que dependiendo de su facies se denomina Fm. Tamaulipas Superior (ambiente de cuenca) o Aurora (ambiente de plataforma arrecifal) (Albiano) y (e) Fm. Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano), conformada por caliza intercalada con horizontes delgados de lutita que incluyen lentes y capas de pedernal.

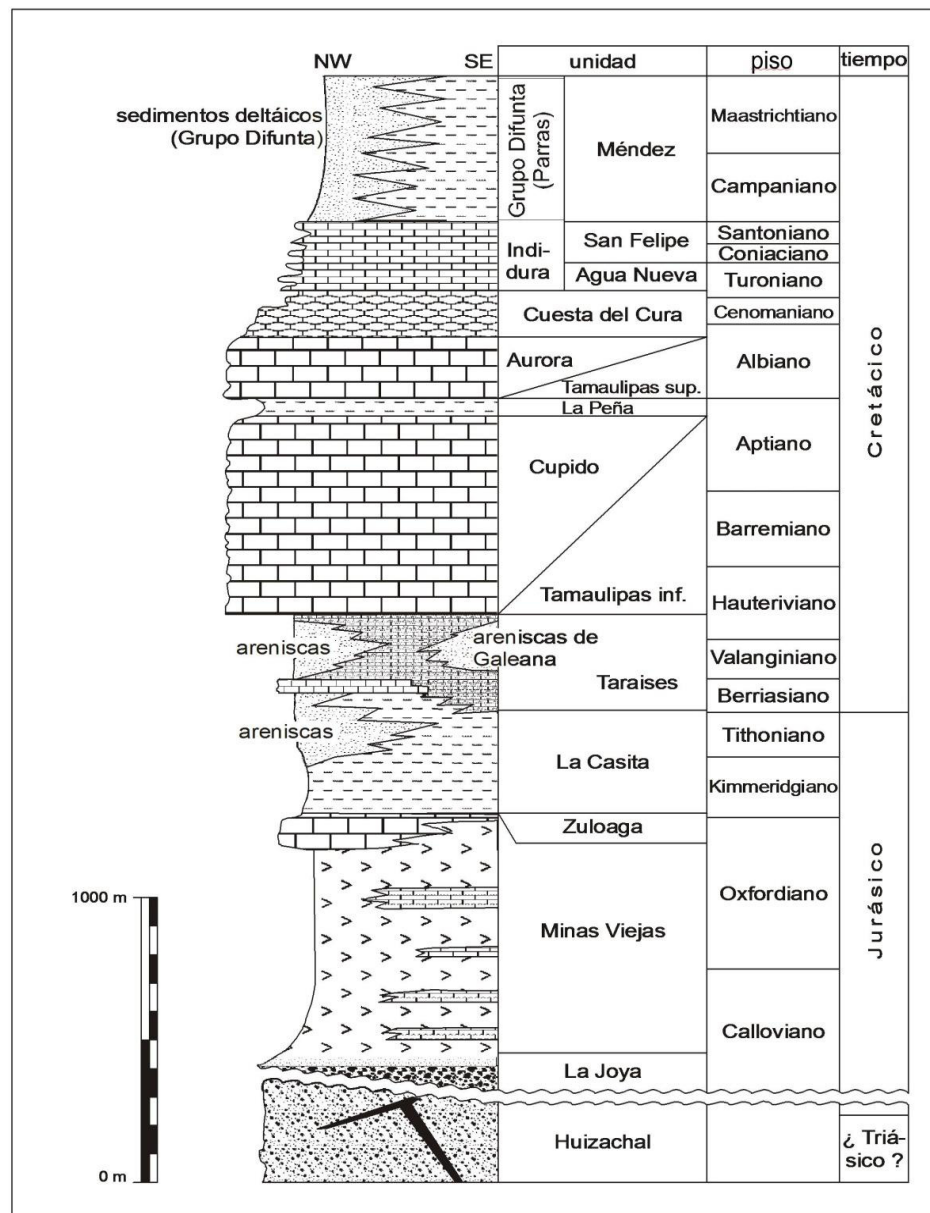


Figura 2.6: Columna estratigráfica generalizada para la Sierra Madre Oriental, NE de México (Michalzik, 1986).

El segundo paquete de rocas está dominado por caliza y lutita, depositada en ambientes de cuenca profunda y plataforma abierta durante el Cretácico Tardío. Estos estratos fueron acortados y cabalgados sobre las plataformas continentales en el Paleoceno durante la Orogenia Laramide (Padilla Y Sánchez, 1986; Goldhammer, 1999). Este paquete incluye tres unidades (Figura 2.6): (a) Fm. Agua Nueva (Turoniano), constituida litológicamente de caliza intercalada con lutita carbonosa, (b) Fm. San Felipe (Coniaciano-Santoniano), conformada por una secuencia de caliza con intercalaciones de lutita, arenisca y horizontes de limolita verde, y (c) Fm. Méndez (Campaniano- Maastrichtiano), compuesta por lutita calcárea de color negro que intemperiza a café amarillento con una exfoliación por intemperismo en forma de agujas.

A continuación se describe de forma breve a cada una de las unidades litológicas que constituyen la estratigrafía de la SMOr.

(a) Grupo Huizachal

Mixon et al. (1959) la describió como una unidad compuesta de lutita calcárea de color rojo claro a medio con limolita, conteniendo granos fino de arenisca y arenisca cuarcítica con conglomerado. El tipo litológico más común es la arenisca limolítica de color rojizo medio. En ocasiones algunas capas de arenisca y lutita son color verdoso, grisáceo, púrpura, ocre y rojo amarillento.

Meiburg *et al.* (1987), en el denominado Alto de Aramberri, N.L., describieron al Grupo Huizachal como una brecha sedimentaria. Está compuesta principalmente de cuarcita, cuarzo y esquistos, todos ellos provenientes del basamento. Los principales afloramientos de capas rojas del Grupo Huizachal se encuentran hacia el Norte en la región de Galeana, Nuevo León, cerca de las localidades San Marcos, Santa Clara, La Purísima y en los Cañones El Alamar y La Perra (Michalzik, 1986, 1988, 1991).

(b) Formación Minas Viejas

El término fue propuesto originalmente por Humphrey y Díaz (1956), quienes la definieron como una unidad de evaporítica que se distribuye en el área que ocupó el Golfo de Sabinas. La Formación Minas Viejas consiste de yeso granular de color gris, blanco y café amarillento con intercalaciones de cuerpos lenticulares de lutita laminar calcárea gris oscura, caliza de color gris oscura y arenisca parcialmente de color rojo, conjunto litológico que fue depositado en un ambiente de aguas someras con fuerte evaporación. Las rocas de esta unidad afloran en el estado de Nuevo León, concentrándose en el área de Galeana, Pablillo, Potrero de Minas Viejas, Montemorelos-Rayones, Sierra del Fraile, Sierra de Los Muertos Coahuila-Nuevo León. Se han reportado espesores variables de 300 a 1000 m, con un promedio de 618 m (Goldhammer, 1999). Se le ha asignado una edad de Calloviano al Oxfordiano.

(c) Formación Zuloaga

Es una unidad de caliza de estratificación gruesa que incluye *Nerinea s.p.*, presentándose en capas de 1-3 metros, generalmente de coloración gris oscura, aunque en las partes inferior y media se pueden apreciar capas de color gris claro, y que en su base presenta alto contenido arcilloso. En algunas ocasiones, en la parte superior pueden presentar nódulos de pedernal negro y localmente algunas capas presentan de bivalvos, gasterópodos o corales pobremente conservados (Pérez-Rul, 1967; Barboza-Gudiño *et al.*, 2004). Su depósito ocurrió en un ambiente epinerítico de aguas tranquilas y tibias.

Imlay (1953) reportó en la Sierra de Sombreretillo, al norte de Melchor Ocampo, Zacatecas un afloramiento de 550 m. Así mismo, reportó un adelgazamiento de la unidad hacia el sur de Nuevo León y al sureste de Tamaulipas (50-100 m). Aflora en los levantamientos anticlinales mayores de la Sierra Madre Oriental, desde la región de Saltillo y Monterrey hacia el sur, hasta la porción meridional de Nuevo León y suroccidental de Tamaulipas (Imlay, 1953). Con base en su contenido fósil se le ha asignado una edad de Oxfordiano – Kimmerigdiano.

(d) Formación La Casita

Está constituida por lutita (en ocasiones con gran contenido de materia orgánica), caliza y arenisca, que cubren concordantemente a la Formación Zuloaga y que fueron depositados en un ambiente nerítico dominado por una sedimentación terrígena. Se encuentra distribuida en gran parte de noreste, norte y nor-noreste del país, ocurriendo en los ejes de los anticlinales de la Sierra Madre Oriental. En la región que abarca de Coahuila a Tamaulipas, se han encontrado variaciones en espesor desde 50 hasta 422 m (Imlay, 1953). Con base en su contenido faunístico, se le ha asignado una edad de Kimmerigdiano-Tithoniano.

(e) Formación Taraises

Se localiza en el Cañón Taraises, en la parte oeste de la Sierra de Parras, Coahuila (Imlay, 1936). El nombre se ha aplicado a calizas y areniscas del Valanginiano que afloran en la parte oeste de la Sierra de Parras, y que consiste de dos miembros. El inferior tiene 74 m de espesor, está compuesto de caliza gris de 3 a 10 cm, con lentes de pedernal e intercaladas con lutita y es más resistente a la erosión que el miembro superior. Este último es de 68 m de espesor, consiste de caliza delgada estratificada y caliza lutítica delgada (Imlay, 1936). Mientras que en la parte oeste de la Sierra de Parras, los estratos más cercanos a la cima contienen capas de arenisca de grano fino y lutita (Ocampo-Díaz *et al.*, 2012). El depósito ocurrió en una cuenca profunda que se hace más somera hacia su contacto superior. Se le ha asignado una edad de Berriasiano-Hauteriviano.

(f) *Tamaulipas Inferior/ Cupido*

Consta de caliza de grano fino y color crema grisáceo en capas medianas y gruesas, de tipo mudstone-packstone, depositada en un margen de plataforma o en arrecife. Cuenta con una amplia distribución superficial en la porción sur de la Península de Tamaulipas y en el frente de la Sierra Madre Oriental. También ha sido identificada en el sector Transversal de la Sierra Madre Oriental en el norte y al noreste de la Cuenca de la Mesa Central. Los máximos espesores medidos de la Formación Tamaulipas Inferior/Cupido se encuentran en alrededor de 850 m. Se le ha asignado una edad de Hauteriviano.

(g) *Formación La Peña*

Fue originalmente descrita por Imlay (1953) como una secuencia de estratos calcáreo-arcillosos, limolitas y bandas de pedernal, depositados en un ambiente de cuenca somera. Su espesor es del orden de 3 a 40 m. La Formación La Peña está ampliamente distribuida en gran parte del norte-noreste de México en la provincia de la Sierra Madre Oriental y Cuenca de Tamaulipas se llega a extender a la porción centro-noroccidental de la Meza Central de México (Labarthe *et al.*, 1982). Por su contenido fósil se le ha ubicado en el Aptiano superior.

(h) *Formación Tamaulipas Superior /Aurora*

Contiene calizas compactas del Albiano inferior a medio, cuyos colores varían de blanco y crema a café claro y café, presentando ocasionalmente intercalaciones de calizas arcillosas, compactas, de color negro. Estas calizas, que se depositaron en un ambiente nerítico de aguas someras o en uno de arrecife, ocurre en el borde oriental de la Cuenca Mesozoica del Centro de México y en la sierra de Tamaulipas, entre los límites estatales de San Luis Potosí y Nuevo León, y al noreste de Monterrey. Asimismo, en el subsuelo en las Cuencas de Tampico–Misantla y de Sabinas. Se ha reportado que muestra un espesor de 130 hasta 600 m.

(i) *Formación Cuesta del Cura*

El término Cuesta del Cura se ha aplicado a una sucesión de caliza ondulosa y compacta tipo mudstone-wackestone, con intercalaciones de arcillas y bandas de pedernal (Imlay, 1953). Algunas capas de caliza se presentan finamente laminadas con bandas grises y negras intercaladas. Su espesor aproximado en una sección típica es de 150 a 300 m. La unidad, que se depositó en un ambiente de aguas profundas y zonas frontales de una plataforma elevada, tiene una amplia distribución en el noreste de México y en la Mesa Central. Se le ha asignado una edad de Albiano medio- Cenomaniano.

(j) Formación Agua Nueva

La Formación Agua Nueva en su localidad tipo consiste de 50 a 100 m de caliza o marga delgada con delgados horizontes de pedernal, intercalados con lutita carbonosa negra que se depositaron en un ambiente de plataforma externa a cuenca. Esta formación se encuentra ampliamente distribuida en los flancos de las elevaciones de la Sierra Madre Oriental (Carrillo-Bravo, 1971). Su contenido faunístico indica Cenomaniano superior – Turoniano.

(k) Formación San Felipe

Consiste de caliza arcillosa en estratos delgados a muy delgados de color gris claro a verde, con frecuentes intercalaciones de lutita calcárea y lutita bentonítica de colores verde y amarillo grisáceo. Esta secuencia fue depositada en un ambiente de plataforma abierta. Su distribución ocurre en la región meridional de la Península de Tamaulipas y en el borde oriental de la Sierra Madre Oriental. En el subsuelo se haya distribuida en las Cuencas de Tampico – Misantla y de Burgos. También se reporta bordeando los flancos norte, nororiental y oriental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí. Su espesor promedio es de alrededor de 250 m (Montañez *et al.*, 2000).

(l) Formación Méndez

Esta unidad consiste de un depósito uniforme de lutita gris-azul de varios metros de espesor, con algunas capas irregulares de arenisca y marga. El espesor es muy irregular, ya que se han reportado 300 m en algunas localidades. Por otro lado, en el área de Jaumave afloran más de 100 m, mientras que en la región de San Nicolás-La Concha y Sinclinal de Valles varía de 150 a 300 m; y en la margen sureste de la Plataforma Valles-San Luis Potosí (sur-sureste de Aquismón) varía de 500 a poco más de 1000 m (Carrillo-Bravo, 1971). Suter (1990) mencionó que es difícil estimar el espesor de la formación, a causa del plegamiento interno, el cual es muy usual. Se le considera un flysch en zona de antifosa en mar abierto. Los sedimentos de esta unidad ocurren en el frente oriental de la Sierra Madre Oriental (Carrillo-Bravo, 1971). Se le ha asignado una edad de Campaniano-Maastrichtiano.

2.5 Vegetación

En la zona de la Llanura Costera del Golfo cerca de las laderas de la SMOr predominan las comunidades de matorral submontano (Canizales-Velázquez *et al.*, 2009). Este tipo de vegetación está constituido por elementos arbustivos altos o árboles bajos, generalmente deciduos por un corto periodo, que son típicos de zonas semi-áridas y cálidas con precipitaciones entre 450 – 900 mm. Las especies típicas en este ambiente incluyen huizache, uña de gato, brasil, cenizo, ancahuita, amargoso, chaparro prieto y barreta. Este arreglo de vegetación ocupa cerca del 11% de la superficie del estado de Nuevo León, siendo el esperado para el Campus de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL, en Linares, N.L

Conforme se asciende por las laderas de la SMOr, el matorral submontano coexiste con el bosque de encino, dominado por individuos del género *Quercus*. El incremento de altitud (generalmente arriba de 1000 m) viene acompañado por la aparición de pino. En estas comunidades de encino se pueden encontrar individuos entre 2 y 30 m de altura, aunque se puede observar hasta 50 m. El bosque de encino puede ocurrir bajo condiciones de clima de semi-cálido subhúmedo a templado sub-húmedo. Su desarrollo se da en condiciones de 10 a 26°C de temperatura promedio, aunque frecuentemente ocurren entre 12 y 20°C, con precipitaciones entre 600 y 1000 mm. Cerca del 95% de este tipo de ambiente vegetal se ubica entre 1200 y 2800 m, intervalo de altitudes observadas entre Iturbide y La Ascensión.

3. METODOLOGÍA

Durante el presente estudio, se aplicó con modificaciones la metodología que sigue el INEGI (2009) en el desarrollo de mapas edafológicos (Figura 3.1) y que es detallada a través del capítulo.

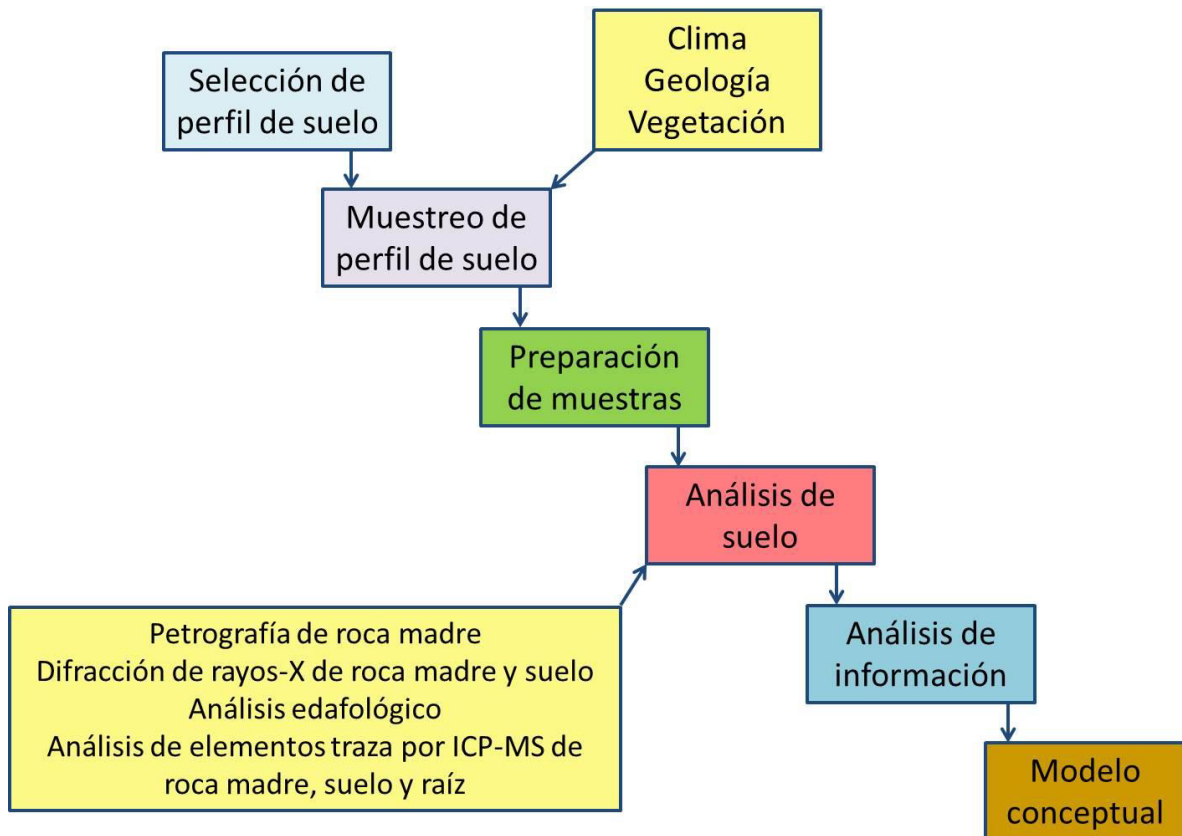


Figura 3.1: Metodología general de trabajo para el estudio de perfiles de suelo (modificado de INEGI, 2009).

3.1 Selección y muestreo de perfil de suelo

Como se ha comentado, el estudio se efectuó a través de un transecto entre la Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, N.L. (Planicie Costera del Golfo) y la comunidad de La Ascensión, Aramberri, N.L. (Sierra Madre Oriental), ubicándose cinco perfiles de suelo típicos para esta región. Cada uno de ellos fue designado con una clave de identificación, registrándose las coordenadas geográficas y la altitud. Se efectuó un análisis inicial de los estratos que conformaban cada perfil, desde la roca madre, pasando al regolito y horizontes con materia orgánica, así como la vegetación desarrollada sobre él. Cada horizonte fue clasificado litológicamente, medido con una cinta métrica y muestreado (~1 kg). Además, se colectó un espécimen de

raíces de encino (*Quercus* spp) o pino (*Pinus* spp) en contacto con el perfil. La estructura edafológica fue documentada en una imagen digital. Finalizado el proceso de levantamiento y muestreo, se realizó una revisión relacionada a las características climáticas (temperatura y precipitación), de geología (unidades litológicas) y forestales (vegetación típica) de cada sitio.

3.2 Preparación de muestras

Las muestras de roca madre para cada perfil fueron descostradas y fragmentadas, a fin de obtener material para la preparación de una lámina delgada, así como de polvo (malla 200; 0.074 mm) para los análisis de difracción de rayos-X y geoquímicos. Las muestras de suelo fueron secadas al ambiente por 3 días y posteriormente pulverizadas para llevar a cabo los análisis edafológicos. Las muestras de raíz fueron secadas al ambiente por 2 días y cortadas. A fin de desarrollar análisis químico de elementos traza, este material fue calcinado a 600°C por 30 minutos, generando una ceniza. Se estableció la pérdida en peso por la calcinación.

3.3 Preparación de láminas delgadas y análisis petrográfico

Las muestras de roca madre libres de polvo y costra fueron utilizadas para generar bloques de 3 cm × 2 cm × 2 cm. Estos fueron pulidos en un disco giratorio con ayuda de agua y polvo abrasivo de carburo de silicio No. 400, hasta obtener una superficie lisa y sin fracturas. La superficie pulida fue adherida a un vidrio porta-objetos con una resina epóxica Korapox 439. El bloque adherido fue cortado hasta tener un espesor de ~1 mm, siendo pulido hasta obtener un espesor de micras, teniendo como referencia el color de interferencia de los cristales de cuarzo. La textura y la mineralogía de la roca se establecieron utilizando un microscopio petrográfico Leica DM750, que contaba con una cámara fotográfica adaptada, y siguiendo los criterios de identificación sugeridos por MacKenzie y Adams (1994).

3.4 Difracción de Rayos-X

La identificación de minerales en la roca y en las muestras de regolito se realizó aplicando un método de difracción de rayos-X (Figura 3.2). Patrones de polvo fueron determinados en un equipo Siemens 5000, instalado en el Departamento de Física Aplicada, CINVESTAV – Instituto Politécnico Nacional (Unidad Mérida), que incluía un ánodo de cobre ($\text{CuK}\alpha = 1.5418 \text{ \AA}$) en el intervalo $2\theta = 5\text{-}60^\circ$ a una velocidad de barrido de $2^\circ/\text{min}$. La identificación de los minerales se efectuó por comparación automática con los patrones estándar reportados en el *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS). La proporción de cada mineral en una muestra se estableció de forma automática comparando los picos principales (cuentas por segundo) de cada especie.



Figura 3.2: Equipo de Difracción de Rayos-X Siemens 5000 del Departamento de Física Aplicada, CINVESTAV (Unidad Mérida).

3.5 Análisis edafológico

Las muestras de suelo fueron caracterizadas aplicando las siguientes pruebas edafológicas (Woerner, 1991; INEGI, 2000): pH, conductividad eléctrica, color, textura, %yeso, %carbonatos y %materia orgánica. Estos procedimientos se efectuaron en el Laboratorio de Suelos y Nutrición de Bosques de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL (Linares, N.L.).

3.5.1 Textura

El parámetro se define en términos de la composición porcentual de arena, limo y arcilla del suelo. Es una propiedad permanente, ya que no varía de forma importante y es parte de los criterios para clasificación de la USDA (United States Department of Agriculture). El procedimiento (Figura 3.3) se inició con una muestra de ~70 g de suelo que se mezclaron con 50 ml de acetato de sodio. A esta mezcla se le añadió agua hasta completar un volumen de 300 ml y se centrifugó por 15 minutos, desechando el líquido. El sólido fue lavado de forma alternativa con acetato de sodio y agua hasta completar siete ciclos a fin de eliminar carbonatos. Posteriormente, la materia orgánica es eliminada por ataque con peróxido de hidrógeno al 10%. La determinación de la textura se efectuó aplicando el método del densímetro para estimar las fracciones sedimentadas de arena, limo y arcillas. El fenómeno es gobernado por la ley de Stokes (la velocidad de caída de las partículas es directamente proporcional al cuadrado del radio de las esferas).

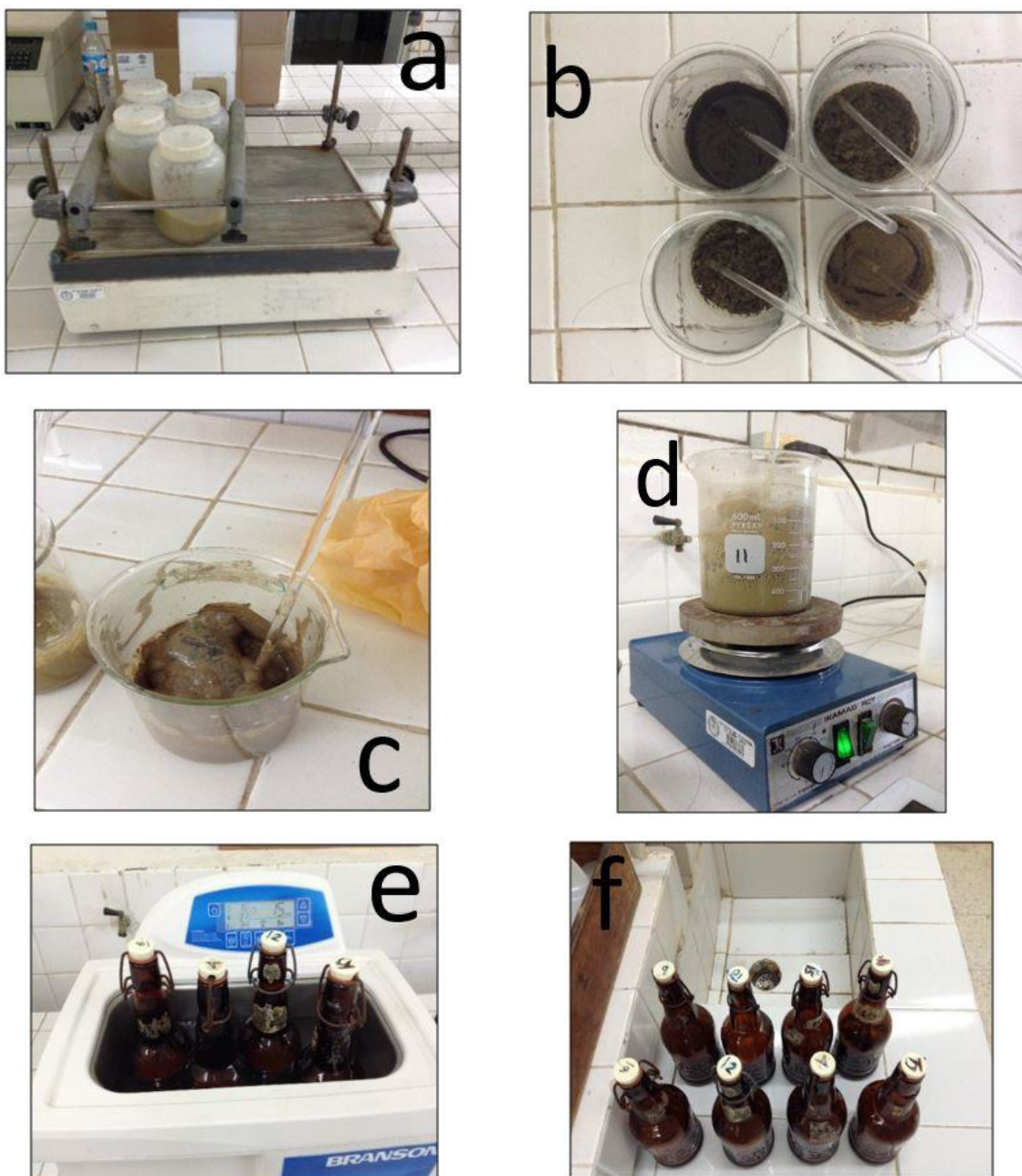


Figura 3.3: Diversos aspectos del análisis de textura por el método de Bouyoucos (FCF-UANL); (a) en frascos de polietileno se le agrega 70g de suelo con 50ml de acetato de sodio, poniendo en el agitador por 5min. (b)(c)(d) al suelo libre de carbonatos se le agrega pequeñas porciones de agua hasta realizar una pasta humedecida, agregado 10ml de peróxido de hidrogeno agitando a que reaccione y enfrié haciendo lo 6 veces, por última vez que se haya hecho reaccionar el peróxido de hidrogeno sobre la plancha de calentamiento se le agrega agua poco a poco hasta evaporar el exceso de peróxido.(e)(f) en las botellas de vidrio oscuras se pesa 40gr se suelo listo (Destruído de M.O. y Carbonatos) agregando 150ml de agua y 100ml de hexametáfosfato de sodio dejando reposar por 15min, dentro de un baño de ultrasonido con agua destilada y dejando reposar toda una noche.

3.5.2 Color

El color del suelo es una de las características más obvias y la más fácilmente observable. Generalmente, el color puede deberse a una serie de condiciones complejas que estén sucediendo actualmente en el suelo o que sucedieron: el material parental, el estado de intemperización de los minerales, el contenido de materia orgánica, las condiciones de drenaje y la aeración del sistema. Este factor representa una gran ayuda para distinguir los horizontes al estudiar el perfil de suelo y puede indicar aspectos de su historia.

Para describir este parámetro se utilizan 100 g de muestra previamente secada al aire y 100 g de muestra húmeda (Figura 3.4). Ambas muestras se contrastan con la Tabla de Munsell (Porta *et al.*, 2011) a fin de efectuar una descripción (por medio de letras y números) del matiz, el brillo y la croma específicos.

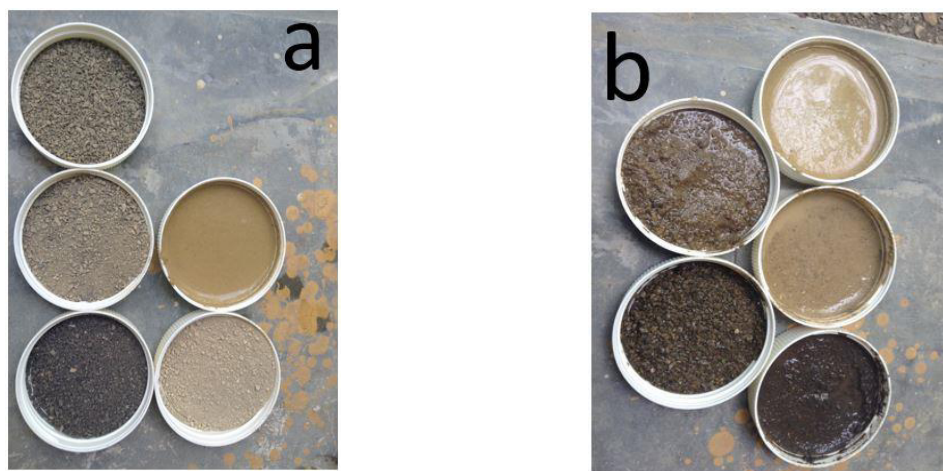


Figura 3.4: Determinación de color en suelo seco; (a) (izquierda) y húmedo: (b) (derecha), según el método NOM-021 REC/NAT-2000 (FCF-UANL).

3.5.3 pH

Esta es una determinación importante ya que representa un indicador de múltiples propiedades químicas, físicas y biológicas que influyen fuertemente en la fertilidad del material. Es una de las mediciones más comunes e importantes en los análisis rutinarios de suelo, ya que controla las reacciones químicas y biológicas, haciendo referencia a su grado de acidez o basicidad. Se expresa por medio del parámetro pH y se efectúa siguiendo la Norma Oficial NOM-021-REC/NAT-2000 por medio de un electrodo calibrado (Figura 3.5).

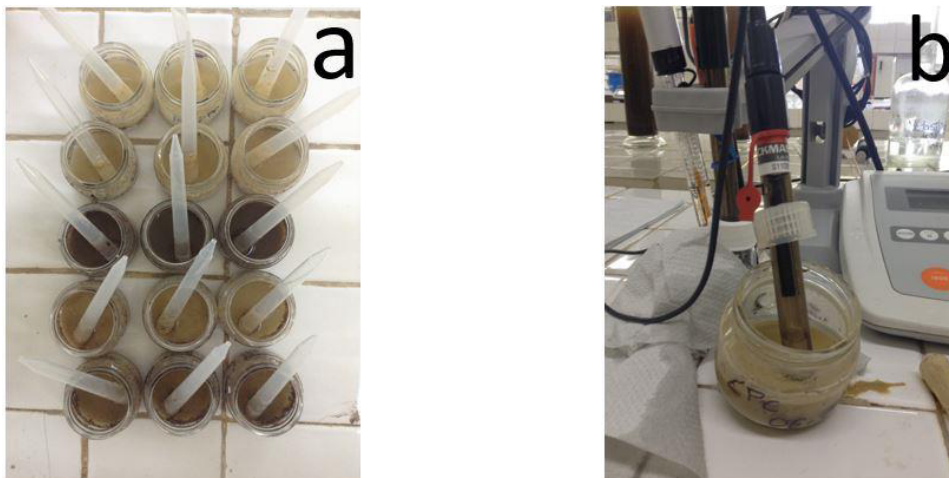


Figura 3.5: Medición de pH del suelo (FCF-UANL), (a) suelo con 20ml de cloruro de calcio teniendo en cuenta intervalos de 5min, durante 30min. (b) teniendo lectura del pH al momento en que se haya estabilizado.

3.5.4 Conductividad eléctrica

Es la habilidad de una solución acuosa para transportar un flujo de electrones. La conductividad eléctrica ha sido el parámetro más ampliamente utilizado en la estimación de la salinidad. Se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica puede desplazarse a través de una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en la solución (Honorato, 2000). Generalmente, los suelos que muestran un pH encima de 7.6 medido en solución de cloruro de calcio 0.01M tienen un contenido alto de sales solubles. La medición se efectúa utilizando un electrodo calibrado con una solución estándar de KCl.

3.5.5 % Materia orgánica

Es reconocido como un agente primordial en la fertilidad del suelo (Juárez *et al.*, 2006). Se ha denominado a la MO como la “sangre vital” del suelo, presentando un impacto sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo (Ortiz y Ortiz, 1980). La MO se ha definido como una mezcla de restos vegetales y animales y sus productos de descomposición, sustancias húmicas de síntesis y microorganismos, que junto con las enzimas, son los responsables de los innumerables procesos bioquímicos y biológicos que ocurren en el suelo y, por lo tanto, de su funcionamiento (Julca-Otiniano *et al.*, 2006). La MO se asocia con la liberación de nitrógeno, fósforo y azufre y a la disponibilidad de Fe, Mg, Cu y Zn, por la acción quelatante que presenta. Un alto contenido de materia orgánica da lugar a una mayor conductividad hidráulica, mayor porosidad, menor densidad aparente y menor compactación (Castellanos *et al.*, 2000). Su determinación se efectúa por titulación con sulfato ferroso después de que la muestra es tratada con dicromato de potasio 0.07 M.

3.5.6 Contenido de yeso

La presencia de yeso $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en el suelo puede afectar de diferente manera a nivel agronómico, presentando problemas de abonado fosfatado, dificultad del paso de las raíces debido al endurecimiento excesivo de los horizontes ricos en este mineral. El yeso suele ser un componente importante en suelos de zonas áridas y semiáridas. A medida que aumenta su contenido, la influencia de los minerales de arcilla va perdiendo importancia cuantitativa en el suelo (Porta *et al.*, 2011). Su determinación se efectúa de forma indirecta considerando la conductividad eléctrica del suelo disperso en agua (Figura 3.6).

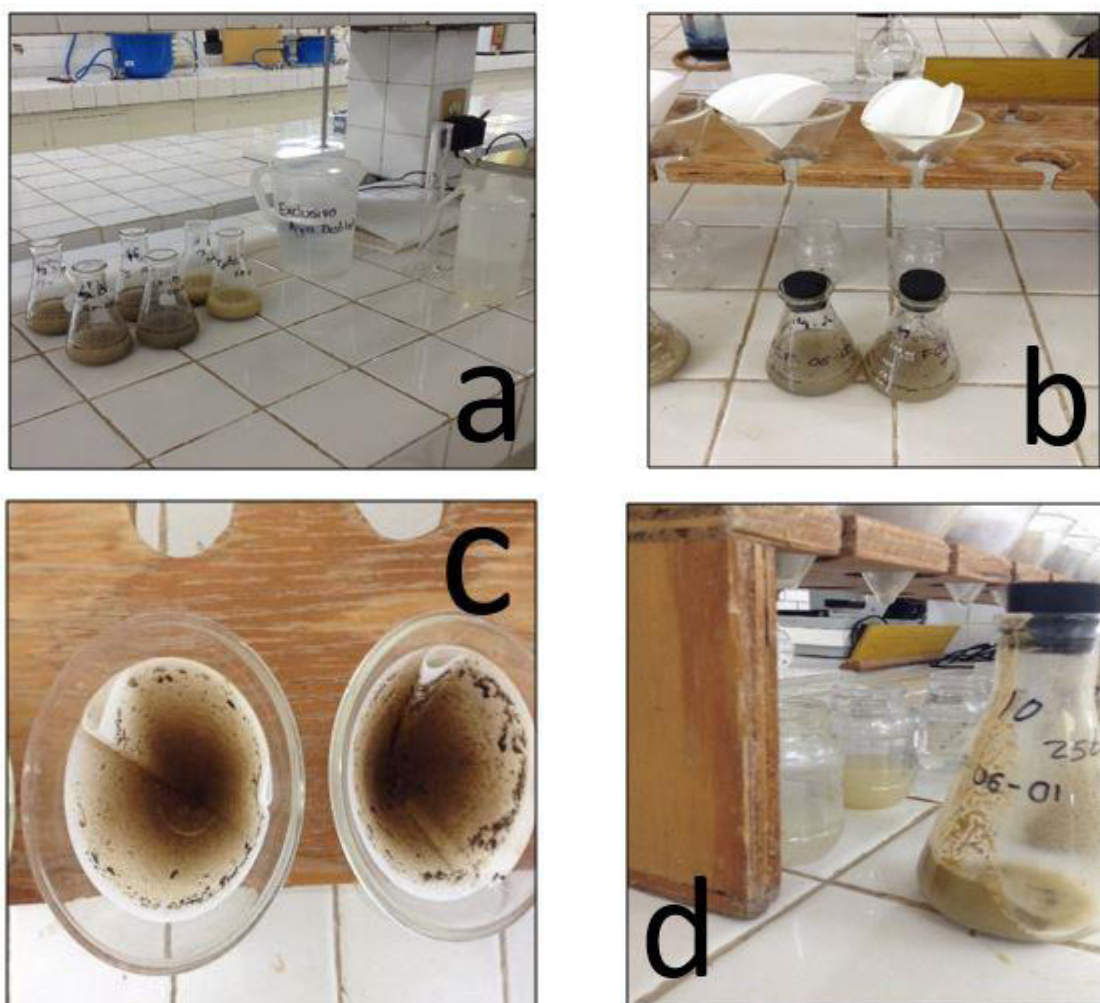


Figura 3.6: Determinación del contenido de yeso en suelos (FCF-UANL). (a) pesar 20g de suelo en un matraz Erlenmeyer añadiendo agua destilada 50ml, agitando 30min con una velocidad constante. (b)(c)(d) filtrar la sustancia a través de papel filtro (No. 1).

3.5.7 Contenido de carbonatos

El ion carbonato se encuentra en los suelos formando compuestos con elementos alcalinotérreos, principalmente con el calcio (CaCO_3), y con el calcio y el magnesio en la dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). Al considerar la fertilidad del suelo, es conveniente conocer su contenido de carbonatos, ya que una alta concentración puede inducir deficiencias de fósforo, zinc, hierro y manganeso en los cultivos (Rodríguez y Rodríguez, 2002). Su determinación se efectúa por medición del CO_2 generado como resultado del ataque con HCl a la muestra.

3.6 Análisis químico de elementos traza

Este procedimiento se efectuó en el Centro de Geociencias, UNAM (Juriquilla, Qro.). Las muestras (~100 mg) en polvo de roca y suelos (malla 200), así como la ceniza generada desde las muestras de raíz fueron atacadas con una solución de HF concentrado en bombas de teflón, hasta obtener un residuo naranja. Este fue disuelto con HCl concentrado y agua ultra-pura. La solución resultante fue analizada para elementos traza en un espectrómetro de masas Q-ICP-MS Thermo ICap Qc, equipado con una celda de colisión/reacción (He , N_2 , NH_3 y O_2) a fin de reducir interferencias espectrales. La calibración del método se efectuó con diversas muestras de referencia geoquímica. La determinación por ICP-MS se basa en la ionización inicial de los átomos presentes en la solución. Las especies generadas se transportan y se separan de acuerdo a la relación carga/masa al atravesar un campo de deflexión magnética (Velasco-Tapia y Verma, 1996).

3.7 Base de datos y análisis de información

La información generada durante este trabajo fue almacenada en una base de datos con formato EXCEL 2011, que incluyó tres carpetas: (a) edafología, (b) mineralogía y (g) geoquímica. Adicionalmente, para cada muestra se generó una carpeta de imágenes de campo (formato *.jpg) y difractogramas de polvo (formato *.eva y *.raw). En la Tabla 3.1 se reporta el número de muestras estudiadas por perfil, de acuerdo a las diferentes metodologías aplicadas. A partir de esta base se generaron tablas y figuras. Se estableció un modelo para descripción de cada perfil y sus horizontes, el cual permitió proponer un modelo conceptual que explique las características edafológicas, mineralógicas y químicas.

Tabla 3.1: Relación del número de muestras estudiadas por metodología analítica

Perfil	Análisis Edafológicos	Análisis DRX	Petrografía	Geoquímica
FCF	5	5	0	0
LCR	3	4	1	3
TAP	3	4	1	3
PAB	4	5	1	3
ASC	4	4	0	2

4. RESULTADOS

4.1 Ubicación de perfiles edafológicos

La Figura 4.1 muestra la distribución de los sitios en donde se levantaron los perfiles de suelo durante el presente estudio: (a) FCF (Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, NL; coordenadas UTM: 14R 0446949, 2741000; altitud: 370 msnm); (b) LCR (Las Crucitas, Linares, NL; coordenadas UTM: 14R 0423094, 2736922; altitud: 621 msnm); (c) TAP (Tapia, Iturbide, NL: coordenadas UTM: 14R 0406026, 2735890; altitud: 1646 msnm); (d) PAB (Pablillo, Galeana, NL: coordenadas UTM: 14R 0397347, 2716947; altitud: 2196 msnm); (e) ASC (La Ascensión, Aramberri, NL: coordenadas UTM: 14R 0398843, 2712565; altitud: 2376 msnm).

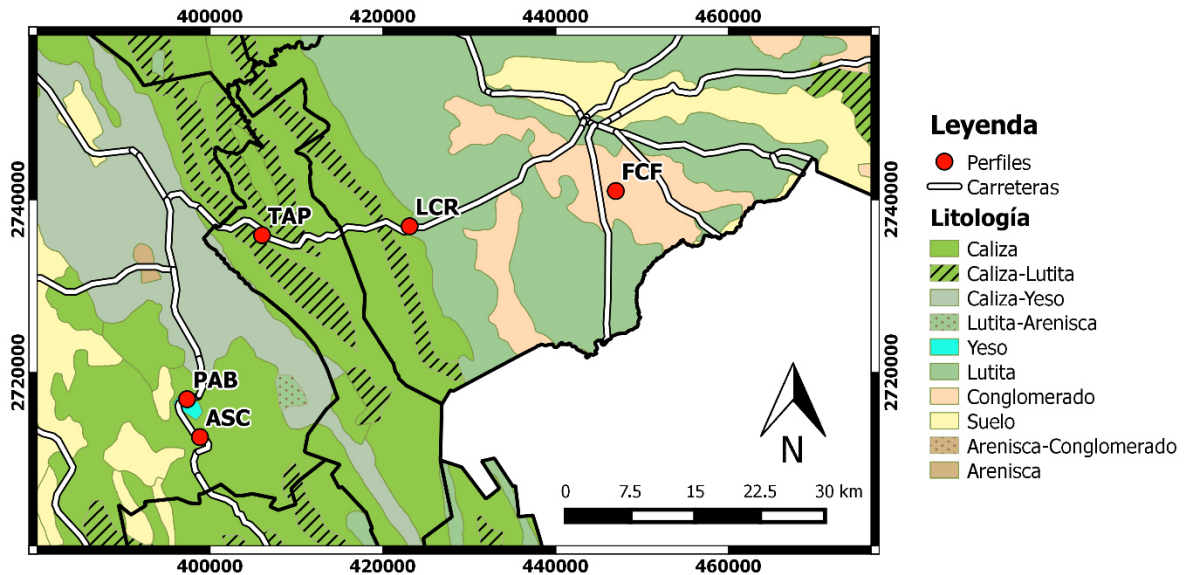


Figura 4.1: Ubicación de perfiles edafológicos en el transecto Linares-La Ascensión (modificado del INEGI, 2015). Abreviaturas: FCF = Facultad de Ciencias Forestales, LCR = Las Crucitas, TAP = Tapia, PAB = Pablillo, ASC = La Ascensión.

El análisis de la distribución espacial de los perfiles en el transecto Linares-La Ascensión permite señalar que se han desarrollado bajo diferentes condiciones de clima (precipitación, temperatura y clasificación de suelo) y de geología (roca madre), generando variaciones en la vegetación (tipo de especies dominantes). Por tal motivo, previo a la descripción detallada de los perfiles bajo estudio, se ha reportado un resumen de estos factores. En cada una de las localidades se ha documentado la estructura del perfil de suelo y los parámetros edafológicos que caracterizan a cada estrato. Además, se ha determinado la composición mineralógica y geoquímica (en elementos traza) de cada capa (excepto para el perfil FCF por cuestiones de presupuesto). Finalmente, se ha descrito la flora predominante en el área.

4.2 Perfil FCF

4.2.1 Descripción general

Este perfil se ubica en una zona dentro de la denominada Planicie Costera del Golfo (Figura 4.1; Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, NL; coordenadas UTM: 14R 0446949, 2741000; altitud: 370 msnm). En esta región, el clima se caracteriza por ser de tipo semicálido subhúmedo (A)Cx'a(e), de acuerdo a la clasificación de Koppen (Kottek *et al.*, 2006). La temperatura máxima promedio ($\sim 25^{\circ}\text{C}$) se alcanza entre junio y agosto, mientras que la mínima promedio es de 12°C entre diciembre y enero (Figura 4.2a). La precipitación anual es de 763 mm, con picos en mayo (110 mm) y septiembre (180 mm) (Figura 4.2b).

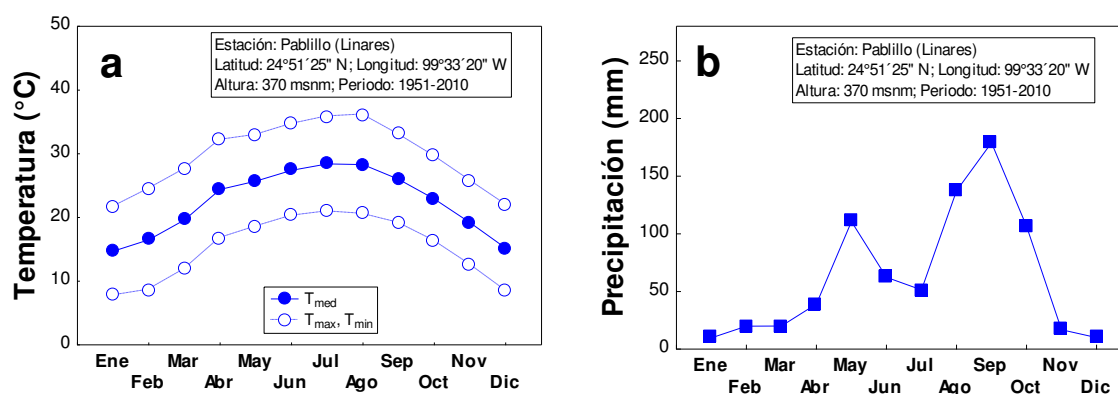


Figura 4.2: Variación mensual de (a) la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y (b) la precipitación (mm) en la estación Pablillo (Linares, N.L.) para el periodo 1951-2010 (CNA, 2010).

El perfil de suelo estudiado en esta localidad se desarrolla a partir de la Formación Méndez (Campaniano – Maastrichtiano), con un espesor total de 128 cm. Esta unidad se presenta como un depósito de lutita calcárea con ~ 60 cm de espesor y un color gris, en donde no se aprecia con facilidad la estratificación (Figura 4.3).



Figura 4.3: Afloramiento de lutita de la Formación Méndez, a partir de la cual se desarrolla el perfil de suelo FCF (Linares, N.L.).

Por otra parte, en este sitio predomina una vegetación correspondiente a matorral sub montano, donde se presentan especies como: Huizache (*Acacia farnesiana*), Mezquite (*Prosopis Laevigata*), Coyotillo (*Karwinskia humboldtiana*), Granjeno (*Celtis pallida*), Cenizo (*Leucophyllum frutescens*), con alturas menores a 1.5 m y cobertura vegetal aproximada de 55 -70 %.

4.2.2 Edafología

De acuerdo a sus características, el perfil FCF fue clasificado como litosol (USDA, 2003). Como ya se ha comentado, el perfil parte de un cuerpo de lutita sobre el que se desarrolla un suelo con horizontes no muy bien definidos, en los que domina una textura franca. No existe un patrón claro de variación en los parámetros edafológicos (Tabla 4.1): pH (7.3 – 7.7), conductividad eléctrica (66 – 91 $\mu\text{S}/\text{cm}$), carbonatos (13-64%) y materia orgánica (0.67-7.52%). Cabe señalar que los horizontes superiores FCF-06-1 y FCF-06-0 (Figura 4.4) podrían representar un nuevo desarrollo edafológico después de un proceso de inundación previo, representado por el horizonte FCF-06-2.

Tabla 4.1: Resultados del análisis edafológico de las muestras de suelo del perfil FCF

Muestra	Color (base húmeda)	Textura	pH	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Materia orgánica (%)	Carbonatos (%)
FCF-06-0	10YR-3/3	Arenosa	7.370 \pm 0.025	66.2 \pm 1.7	0.94	13.0
FCF-06-1	5Y- 5/6	Franco limoso	7.680 \pm 0.025	88 \pm 5	0.67	39.1
FCF-06-2	2.5- 4/1	Franco Arcillo Limoso	7.720 \pm 0.000	79 \pm 5	2.01	63.7
FCF-06-3	5Y-2.5/1	Franco Arcillosa	7.53 \pm 0.19	91 \pm 9	7.52	29.6
FCF-06-4	2.5Y- 4/4	Franca	7.32 \pm 0.11	79.8 \pm 1.0	2.01	36.6

4.2.3 Mineralogía

De acuerdo a un análisis de difracción de rayos-X (Figura 4.5), la mineralogía observada en el material parental del perfil FCF (lutita calcárea) corresponde a cuarzo (SiO_2 , 42.47%) + calcita (CaCO_3 , 39.15%) + albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, 10.93%) + montmorillonita ($\text{Ca}_{0.2}[\text{Al,Mg}]_2\text{Si}_4[\text{OH}]_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 7.45%) + illita ($\text{K}[\text{Al,Mg,Fe}]_2[\text{Si,Al}]_4\text{O}_{10}[\text{OH}]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, trazas). Este arreglo de minerales se mantiene en los estratos que sobreyacen a la roca madre, aunque la presencia de calcita y albita se incrementa hacia el estrato FCF-06-2 y después disminuye hacia el techo del perfil.

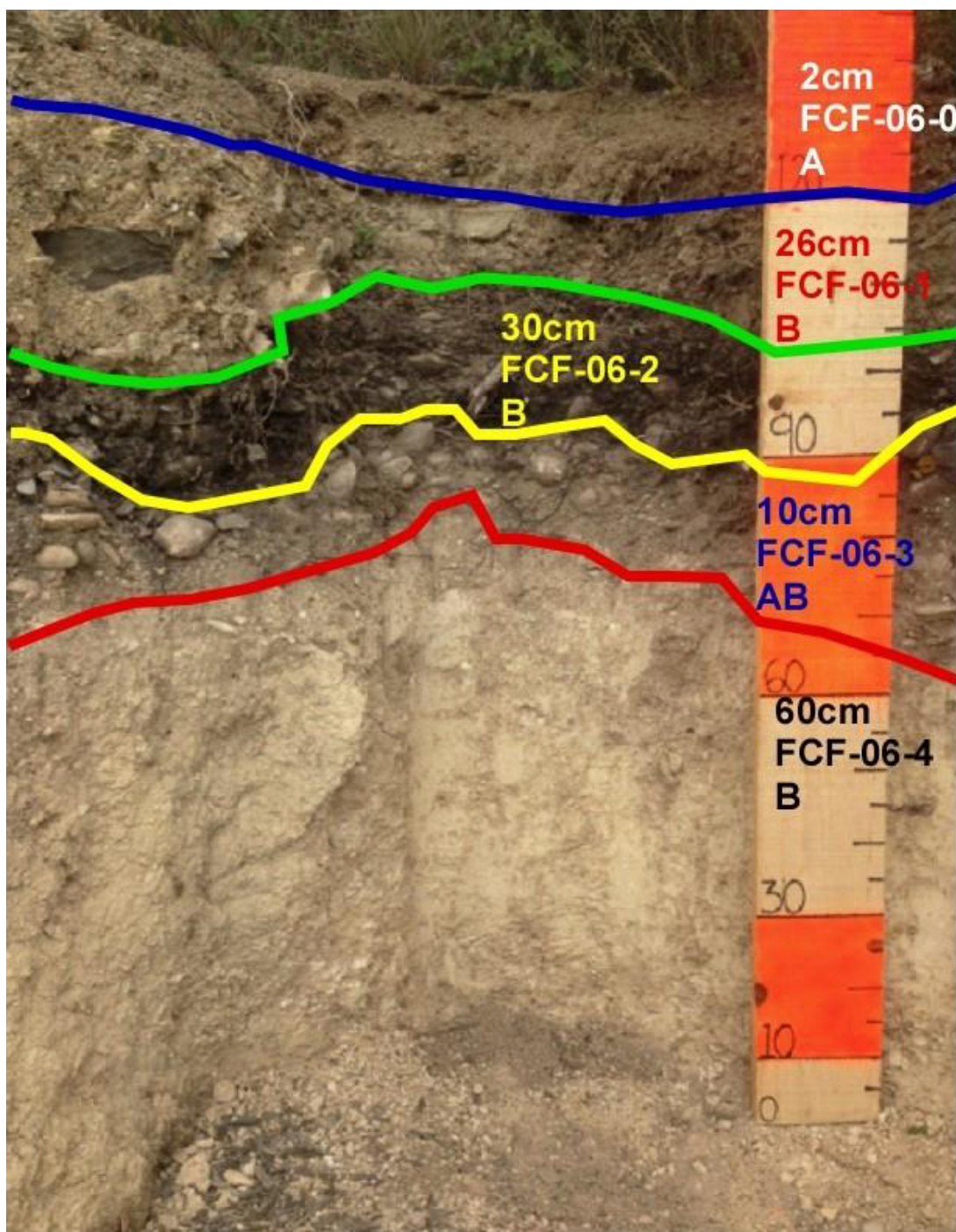


Figura 4.4: Perfil de suelo FCF (litosol) que incluye horizontes de diagnóstico: FCF-06-4 = horizonte B; FCF-06-3 = horizonte AB; FCF-06-2 = horizonte A; FCF-06-1 = horizonte B; y FCF-06-0 = Horizonte A.

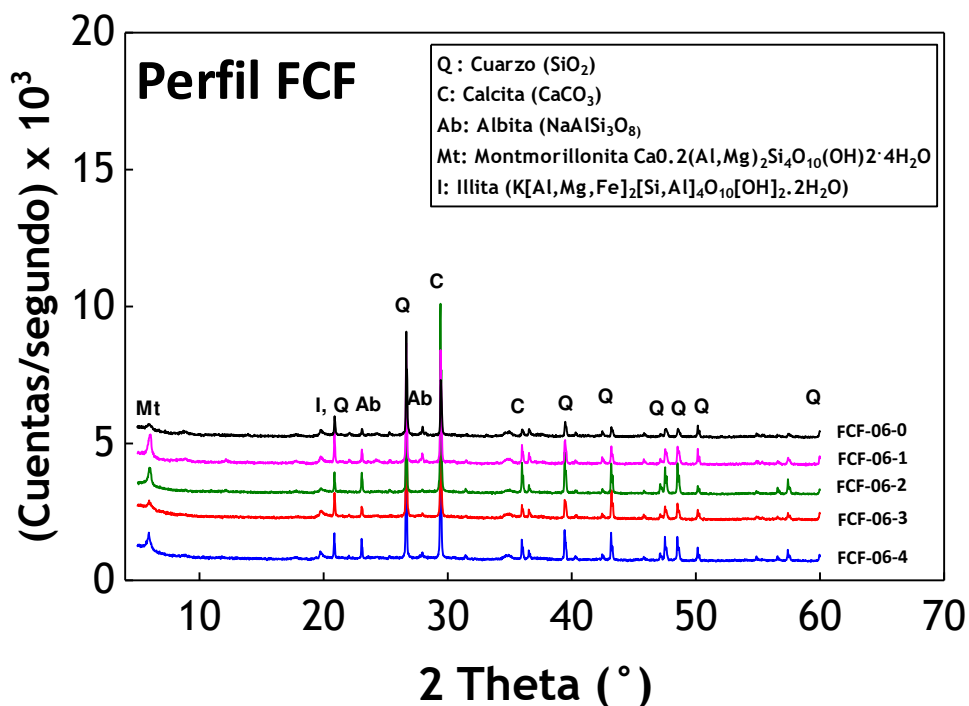


Figura 4.5: Difractogramas de los Horizontes correspondientes al perfil FCF.

4.3 Perfil LCR

4.3.1 Descripción general

Este perfil se ubica en los límites de la Planicie Costera del Golfo con la Sierra Madre Oriental (Figura 4.1; Las Crucitas, Linares, NL; coordenadas UTM: 14R 0423094, 2736922; altitud: 621 msnm). En esta región, el clima se caracteriza por ser de tipo semiárido calido BSh, de acuerdo a la clasificación de Koppen (Kottek et al., 2006). La temperatura máxima promedio ($\sim 26^{\circ}\text{C}$) se alcanza entre junio y septiembre, mientras que la mínima promedio es de 13°C entre diciembre y enero (Figura 4.6a). La precipitación anual es de 989 mm, con picos en julio (124mm) y septiembre (260 mm) (Figura 4.6b).

El perfil de suelo estudiado en esta localidad se desarrolla a partir de la Formación San Felipe (Santoniano – Coniaciano). Esta unidad se presenta como un cuerpo de estratos alterados (espesor total de ~ 100 cm; LCR-07-2), conformada por horizontes de caliza gris margosa y capas de lutita café. Sin embargo, no se aprecia con facilidad la estratificación (Figuras 4.7). Sobre este cuerpo se desarrollan horizontes edafológicos de tipo C (150 cm; LCR-07-3) y A (30 cm; LCR-07-4).

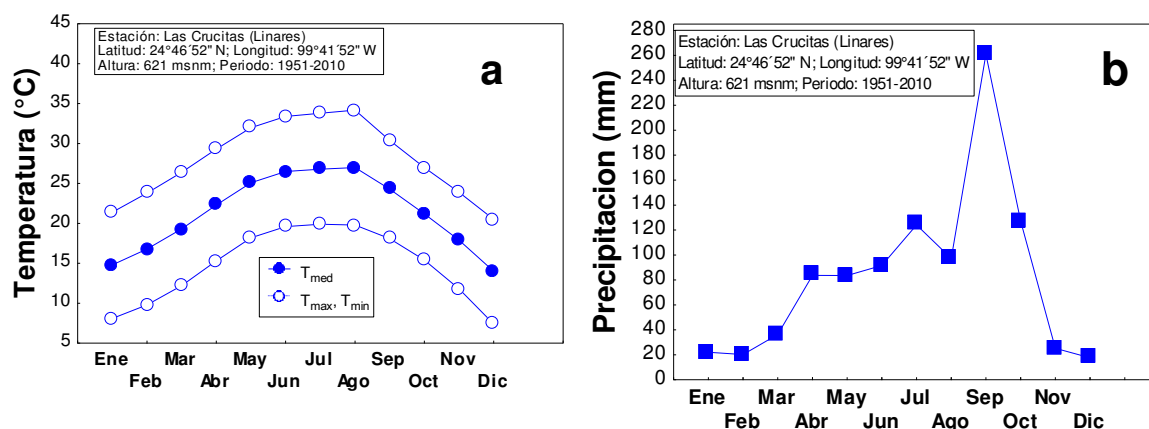


Figura 4.6: Variación mensual de (a) la temperatura (°C) y (b) la precipitación (mm) en la estación Las Crucitas (Linares, N.L.) para el periodo 1951-2010 (CNA, 2010).

Por otra parte, en este sitio predomina una vegetación de transición de matorral submontano a bosque de encino, en donde ocurren especímenes de las siguientes especies: Barreta (*Helietta parvifolia*), Chapote prieto (*Diospyrus texana*), Tenaza (*Havardia pallens*), Barreta (*Helietta parifolia*), Cenizo (*Leucophyllum frutescens*) y Encino (*Quercus spp.*).

4.3.2 Edafología

De acuerdo a sus características, el perfil LCR fue clasificado como Regosol (USDA, 2003), con un espesor total de 280 cm. Como ya se ha comentado, el perfil parte de un cuerpo de caliza alterada sobre el que se desarrolla un suelo con horizontes no muy bien definidos, en los que dominan las texturas francas. No existe un patrón claro de variación en los parámetros edafológicos (Tabla 4.2): pH (7.3 – 7.6), conductividad eléctrica (79 – 126 $\mu\text{S}/\text{cm}$), carbonatos (1-17%) y materia orgánica (0.80-4.16%). Cabe señalar que los horizontes superiores LCR-07-04 (Figura 4.8) podrían representar otro desarrollo edafológico.

Tabla 4.2: Resultados del análisis edafológico de las muestras de suelo del perfil LCR

Muestra	Color (base húmeda)	Textura	pH	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Materia orgánica (%)	Carbonatos (%)
LCR-07-4	10YR-3/4	Franco Arcillosa Arenosa	7.39 \pm 0.08	126 \pm 8	4.16	1.0
LCR-07-3	7.5YR-4/4	Franco Arcillosa Arenosa	7.670 \pm 0.032	79.7 \pm 1.1	0.80	17.6
LCR-07-2	7.5YR-3/4	Franca	7.630 \pm 0.011	87.8 \pm 2.5	0.94	6.9

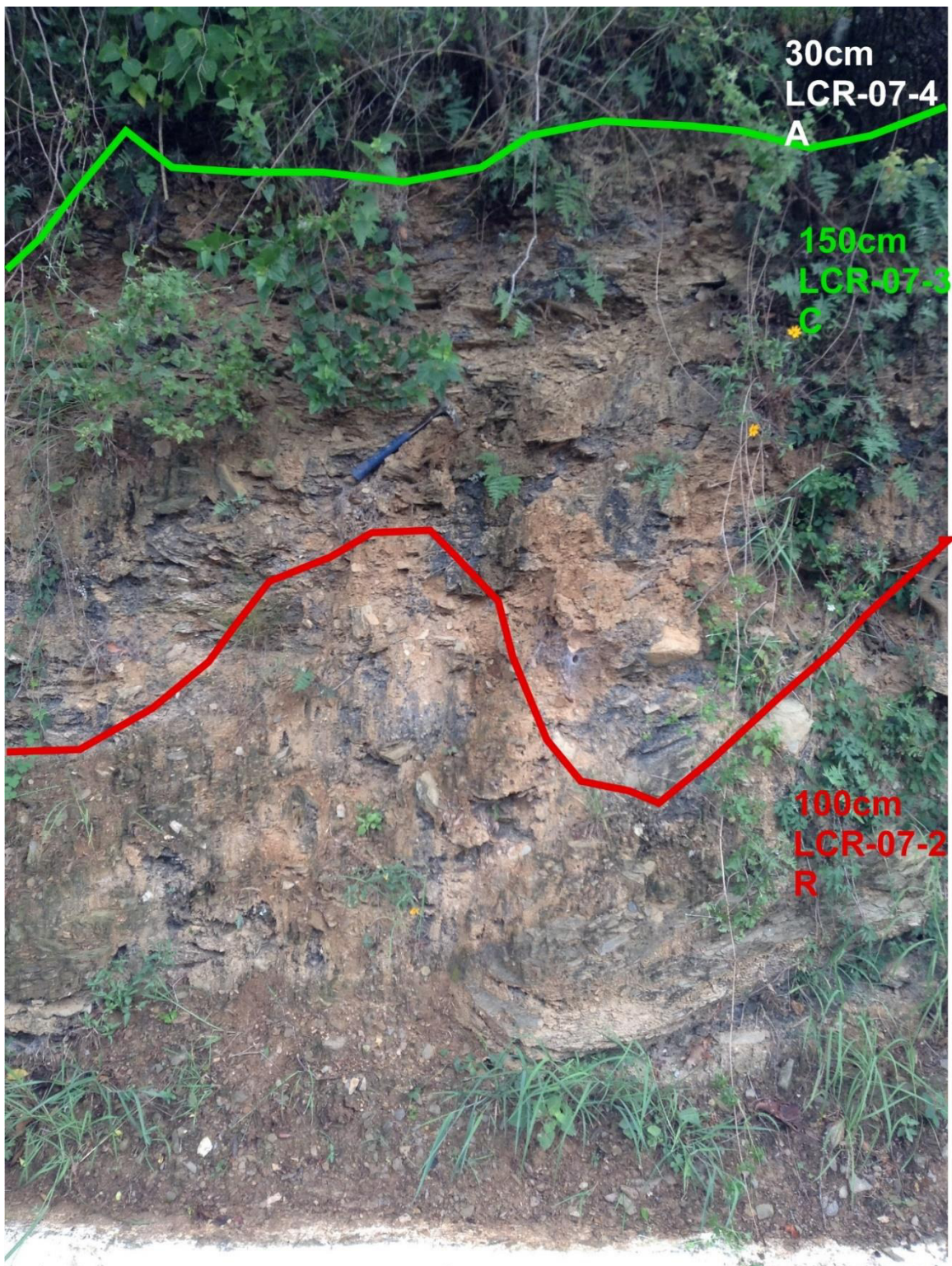


Figura 4.7: Perfil de suelo LCR (Regosol), que incluye horizontes R (LCR-07-2), C (LCR-07-3) y A (LCR-07-4).

4.3.3 Mineralogía

La roca madre corresponde a una litología carbonatada con cuarzo y arcillas de grano fino o *mudstone* arcilloso. La roca muestra en ocasiones pequeñas fracturas rellenas de calcita y óxidos de fierro (Figura 4.8). La mineralogía observada, de acuerdo a un patrón de rayos-X (Figura 4.9) corresponde a cuarzo (SiO_2 , 34.17%) + calcita (CaCO_3 , 20.78%) + albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, 5.27%) + montmorillonita ($\text{Ca}[\text{Al,Mg}]_2\text{SiO}_{10}[\text{OH}]_2$, 15.19%) + Illita ($\text{K}[\text{Al,Mg,Fe}]_2[\text{Si,Al}]_4\text{O}_{10}[\text{OH}]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 24.05%). El arreglo de minerales se conserva con el desarrollo del suelo, aunque el máximo de calcita se observa en el horizonte LCR-07-3.

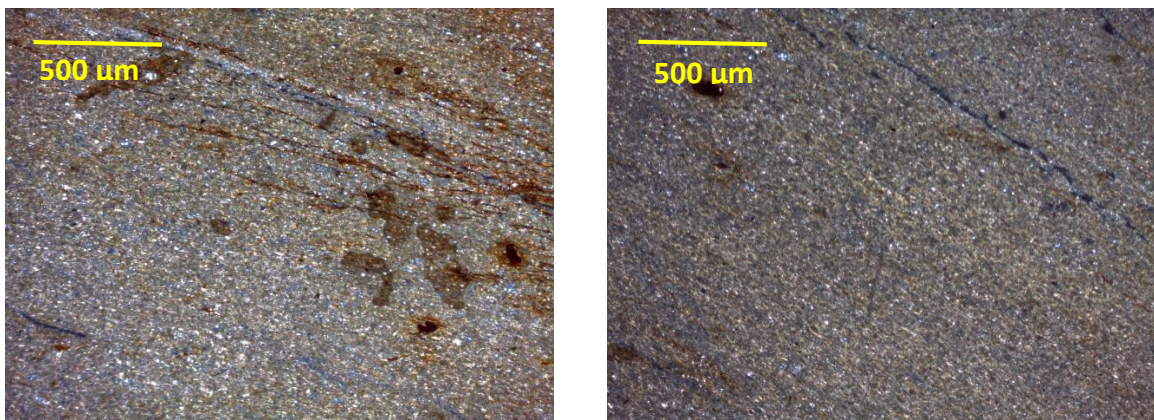


Figura 4.8: Microfotografías (NX; Objetivo 4X) de la roca madre LCR-07-1, correspondiente a un *mudstone* arcilloso de la Formación San Felipe.

4.3.4 Química de elementos traza

En la Tabla 4.3 se reporta la composición química en elementos traza para la roca madre (LCR-07-1 y LCR-07-2), estrato de suelo (LCR-07-4) y una raíz de encino (LCR-07-5) del perfil LCR. Una inspección inicial de los datos indica un incremento en la composición en los diferentes tipos de elementos (litófilos, lantánidos, de campo electrostático fuerte o metales de transición) con el desarrollo edafológico, con excepción del Sr. Este elemento disminuye su concentración de la roca madre hacia los estratos.

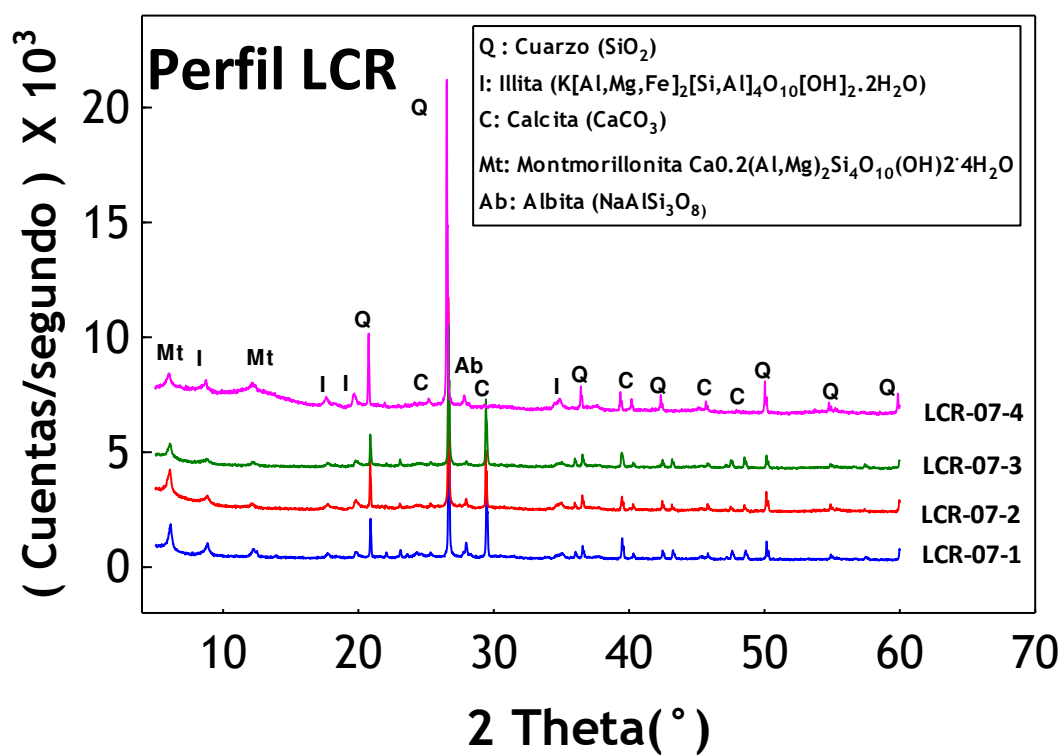


Figura 4.9: Difractogramas correspondientes a los horizontes que conforman al perfil LCR.

Por otra parte, destaca la capacidad de absorción de la raíz de encino en algunos elementos, expresada como % de composición con respecto al horizonte de contacto (LCR-07-4). Entre los casos más importantes se encuentran, por ejemplo: (a) boro, que muestra una composición de ~37% (retención = $[\text{raíz/estrato}] \cdot 100$); (b) estroncio, que muestra una composición de ~170%, siendo la más alta que se ha observado; y (c) bario, que muestra una composición de ~49%. Es muy probable que estos elementos sean utilizados en los procesos de metabolismo de la planta.

Tabla 4.3: Resultados de análisis de elementos traza (en ppm) por ICP-MS para el perfil Las Crucitas (LCR)

Elemento	LCR-07-1	LCR-07-2	LCR-07-4	LCR-07-5 (Raíz)
Li	33.0	45	50	2.04
Be	1.6	2.5	2.6	0.11
B	51	102	102	38.7
P ₂ O ₅	0.15	0.15	0.22	0.09
Sc	11.5	16.9	19.9	
TiO ₂	0.6	0.8	0.9	0.9
V	140	197	204	0.8
Cr	61	83	87	10.1
Co	11.0	13.7	14.4	1.36
Ni	30	39.1	39.3	8.6
Cu	19	30.5	37.3	17.7
Zn	105	126	129	60
Ga	15.9	23.5	24.7	0.10
Rb	89	121	137	3.5
Sr	248	83	84	142
Y	18.3	21.2	27.1	0.03
Zr	104	118	136	5.5
Nb	10.5	14.5	15.0	0.44
Mo	0.8	0.8	0.9	0.7
Sn	1.8	2.7	3.0	1.1
Sb	0.6	1.1	1.4	2.7
Cs	4.9	8.1	9.4	0.10
Ba	244	354	532	261
La	19.4	24.0	29.0	0.43
Ce	40.7	56	64	1.2
Pr	4.8	5.9	7.3	0.06
Nd	18.2	22.3	27.7	0.73
Sm	3.7	4.7	5.9	0.09
Eu	0.8	1.0	1.3	0.08
Tb	0.5	0.7	0.8	0.01
Gd	3.4	4.2	5.3	0.17
Dy	3.2	3.8	4.9	0.03
Ho	0.7	0.8	1.0	0.02
Er	1.9	2.1	2.7	
Yb	1.9	2.1	2.7	
Lu	0.27	0.29	0.38	0.004
Hf	2.8	3.3	3.9	0.03
Ta	0.8	1.0	1.1	0.01
W	0.8	1.0	1.1	0.08
Tl	0.5	0.9	0.9	0.01
Pb	13.4	21.0	32.6	3.33
Th	7.0	8.9	10.7	0.33
U	2.1	2.5	3.0	0.05

Las concentraciones de P₂O₅ y TiO₂ están reportadas en % en peso.

4.4 Perfil TAP

4.4.1 Descripción general

Este perfil se ubica en la localidad Tapia en los límites entre los municipios de Iturbide y Galeana, dentro de la Sierra Madre Oriental (Figura 4.1; (Tapia, Iturbide, NL: coordenadas UTM: 14R 0406026, 2735890; altitud: 1646 msnm). En esta región, el clima se caracteriza por ser de tipo semiárido frio BSk, de acuerdo a la clasificación de Koppen (Kottek et al., 2006). La temperatura máxima promedio ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) se alcanza entre mayo y septiembre, mientras que la mínima promedio es de 8°C entre diciembre y enero (Figura 4.10a). La precipitación anual es de 671 mm, con picos en julio (110 mm) y septiembre (139 mm) (Figura 4.10b).

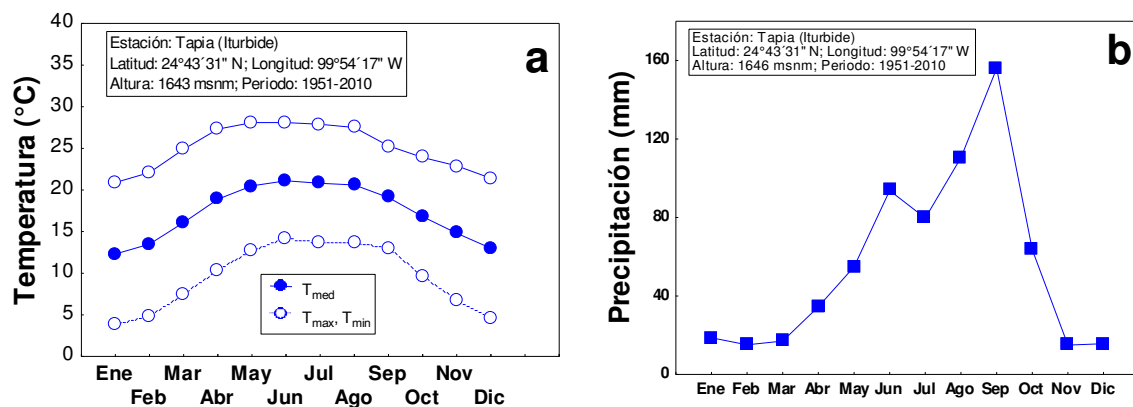


Figura 4.10: Variación mensual de (a) la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y (b) la precipitación (mm) en la estación Tapia (Iturbide, N.L.) para el periodo 1951-2010 (CNA, 2010).

El perfil de suelo estudiado en esta localidad se desarrolla a partir de la Formación Taraises (Valanginiano-Hauteriviano) con un espesor de 150 cm. Esta unidad se presenta como una secuencia de areniscas de espesor intermedio de color gris y evidencia de fracturamiento en varias direcciones (Figura 4.11). Las fracturas están rellenas de calcita y arcilla. Sobre esta roca fracturada se desarrollan horizontes de tipo C (60 cm), A (25 cm) y B (50 cm)



Figura 4.11: Afloramiento de arenisca fracturada de la Formación Tarais en la localidad Tapia (límite entre Iturbide y Galeana, N.L.).

Por otra parte, en este sitio predomina una vegetación de tipo bosque de encino, en donde ocurren especímenes de las siguientes especies: Cedro (*Cedrela spp*), Encino (*Quercus spp*), Álamo (*Populus*), Olmos (*Ulmus*), Pino piñonero (*Pinus pinea*), Magueyes (*Agave*) y Lechuguilla (*Agave lechuguilla*).

4.4.2 Edafología

De acuerdo a sus características, el perfil TAP ha sido clasificado como Regosol (USDA, 2003) de 285 cm. Como ya se ha comentado, el perfil parte de un cuerpo fracturado de arenisca (TAP-07-1) sobre el que se desarrolla un suelo con tres estratos de textura franca o arcillosa (Tabla 4.4; Figura 4.12). Con el desarrollo edafológico se observa una disminución en el pH (7.94 a 5.85), conductividad eléctrica (73.6 a 32.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y el contenido de carbonatos ($\%\text{CaCO}_3$). El horizonte TAP-07-3 es el que concentra la mayor cantidad de materia orgánica.

Tabla 4.4: Resultados del análisis edafológico de las muestras de suelo del perfil TAP

Muestra	Color (base húmeda)	Textura	pH	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Materia orgánica (%)	Carbonatos (%)
TAP-07-4	10YR-3/1	Franca	5.85	32.3	2.14	0.7
TAP-07-3	7.5YR-3/3	Arcillosa	6.95	54.9	3.76	1.2
TAP-07-2	7.5YR-6/6	Franca	7.94	73.6	1.07	26.7

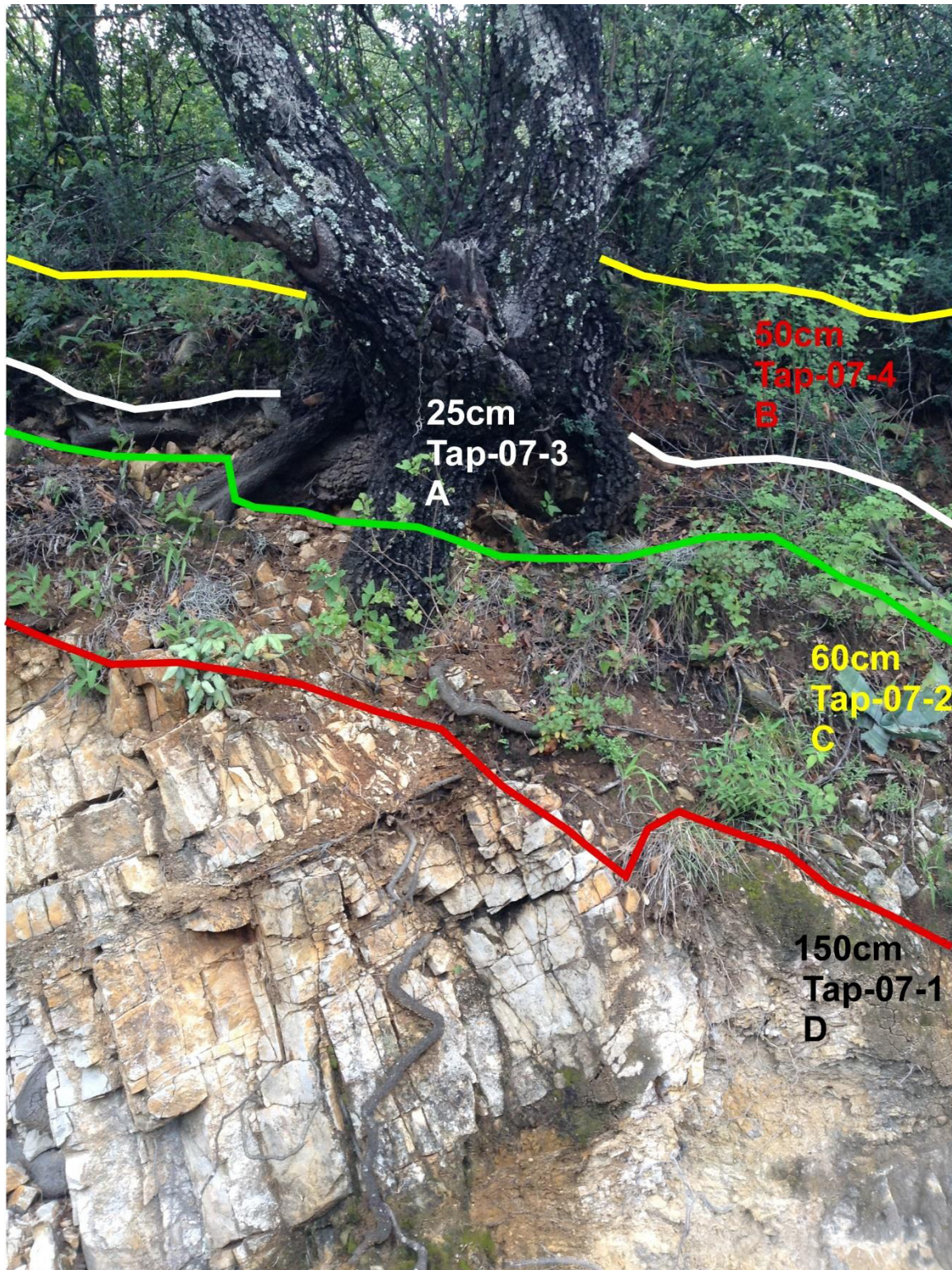


Figura 4.12: Estructura del perfil de suelo TAP (Regosol) en la localidad Tapia (Iturbide-Galeana, N.L.), que incluye la roca madre/horizonte D (TAP-07-1), un horizonte C (TAP-07-2), un horizonte A (TAP-07-3) y un horizonte B (TAP-07-4; tal vez transportado).

4.4.3 Mineralogía

La roca madre corresponde a una arenisca de grano medio, en la que predomina cuarzo, plagioclasa sódica y, en baja proporción, feldespato potásico y biotita (Figura 4.13). De acuerdo a un análisis de difracción de rayos-X (Figura 4.14), la mineralogía observada en el material parental corresponde a cuarzo (SiO_2 , 57.13%) + albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, 36.17%) + Illita ($\text{K}[\text{Al,Mg,Fe}]_2[\text{Si,Al}]_4\text{O}_{10} [\text{OH}]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 3.13%) + montmorillonita ($\text{Ca}[\text{Al,Mg}]_2\text{SiO}_{10}[\text{OH}]_2$, 3.57%). El arreglo de minerales que se presenta en los horizontes de suelo es comparable al de la roca madre. Sin embargo, el horizonte TAP-07-2 presenta una gran cantidad de carbonatos, los cuales prácticamente desaparecen en las capas sobre yacientes.

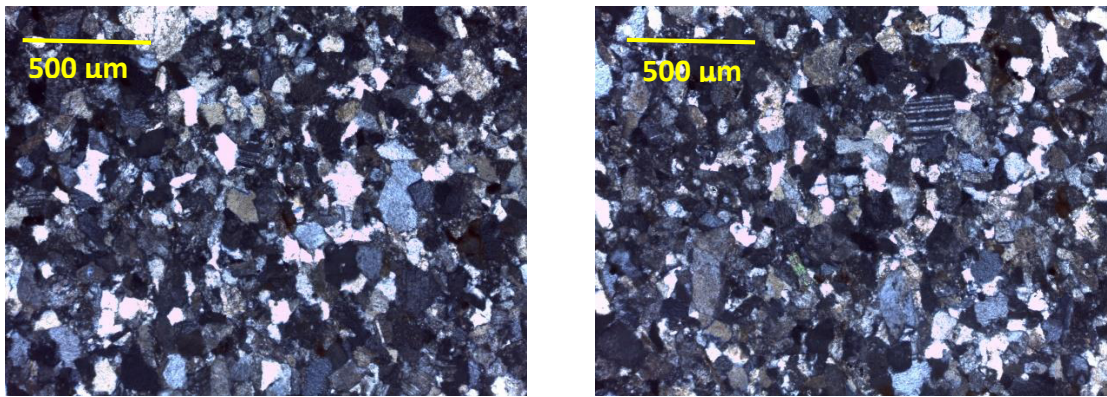


Figura 4.13: Microfotografías (NX; Objetivo 4X) de la roca madre TAP-07-1, correspondiente a una arenisca de grano medio de la Formación Taraises. Esta incluye principalmente cuarzo y plagioclasa sódica, con algunos cristales de feldespato potásico.

4.4.4 Química de elementos traza

En la Tabla 4.5 se reporta la composición química en elementos traza de la roca madre y los horizontes que constituyen el perfil TAP. Se observa un incremento en la concentración de los elementos traza desde la arenisca TAP-07-1 hacia el horizonte TAP-07-3 y una disminución en el estrato TAP-07-4. La única excepción a este comportamiento la presenta el elemento niobio, cuya composición se incrementa con el desarrollo del perfil.

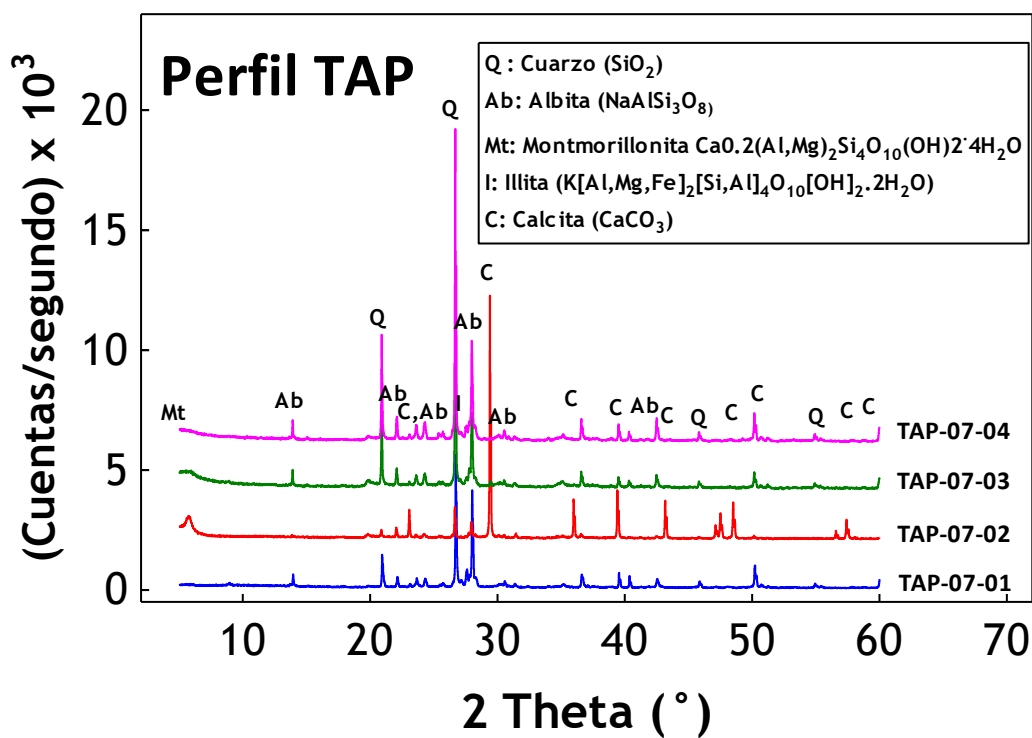


Figura 4.14: Difractograma de los horizontes correspondientes al perfil TAP.

Por otra parte, comparando su concentración con respecto a la observada en el horizonte subyacente, es evidente la retención de los siguientes elementos en la raíz de encino (TAP-07-5): (a) boro con una composición de 122%, (b) zinc con una composición de 142%, (c) estroncio con una composición de 131%, (d) bario con una composición de 40% y (e) fósforo con una composición de 800%. Como ya se ha comentado, la retención de estos elementos podría explicarse como resultado de su uso en los procesos de metabolismo.

Tabla 4.5: Resultados de análisis de elementos traza (en ppm) por ICP-MS para el perfil Tapia (TAP)

Elemento	TAP-07-1	TAP-07-3	TAP-07-4	TAP-07-5 (Raíz)
Li	4.9	31.7	20.6	1.9
Be	0.8	3.34	1.5	0.12
B	17.4	43.0	28.9	35.3
P ₂ O ₅	0.04	0.03	0.01	0.08
Sc	4.3	15.9	6.4	
TiO ₂	0.29	0.49	0.6	0.02
V	34.1	103	49	
Cr	13.6	48.7	21.7	0.8
Co	1.1	9.9	4.6	1.1
Ni	5.6	19.8	9.3	7.4
Cu	16.5	20.1	13.7	7.8
Zn	34.4	66	33.8	48.1
Ga	9.1	21.6	10.8	0.07
Rb	57	98	63	3.2
Sr	51	60	57	75
Y	11.2	33.3	18.0	0.7
Zr	57	106	59	4.4
Nb	4.7	11.0	11.8	0.38
Mo	0.7	1.3	0.9	0.6
Sn	1.1	2.6	1.5	0.7
Sb	0.8	3.5	1.8	0.17
Cs	1.2	7.0	2.9	0.12
Ba	503	561	452	182
La	9.8	27.1	21.0	0.7
Ce	17.1	67	49	1.2
Pr	2.1	7.6	5.2	0.15
Nd	8.3	29.5	19.6	1.2
Sm	1.7	6.8	4.0	0.21
Eu	0.54	1.7	1.0	0.10
Tb	0.25	1.0	0.6	0.30
Gd	1.6	6.4	3.7	0.30
Dy	1.7	6.2	3.2	0.15
Ho	0.36	1.2	0.7	0.04
Er	1.1	3.5	1.8	0.05
Yb	1.2	3.5	1.7	0.04
Lu	0.19	0.5	0.24	0.01
Hf	1.7	3.1	1.6	0.0032
Ta	0.36	0.8	0.8	0.010
W	0.51	0.9	0.9	0.9
Tl	0.30	0.8	0.41	0.029
Pb	6.8	93	42.0	4.6
Th	7.1	12.5	7.8	0.31
U	1.2	2.6	1.7	0.04

Las concentraciones de P₂O₅ y TiO₂ están reportadas en % en peso.

4.5 Perfil PAB

4.5.1 Descripción general

Este perfil se ubica en la localidad de Pablillo (Galeana, N.L.), dentro de la Sierra Madre Oriental (Figura 4.1; Pablillo, Galeana, NL: coordenadas UTM: 14R 0397347, 2716947; altitud: 2196 msnm). En esta región, el clima se caracteriza por ser de tipo Templado Subhúmedo CX', de acuerdo a la clasificación de Koppen (Kottek *et al.*, 2006). La temperatura máxima promedio ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) se alcanza en mayo, mientras que la mínima promedio es de 13°C entre diciembre y enero (Figura 4.15a). La precipitación anual es de 720 mm, con picos en julio (110 mm) y septiembre (139 mm) (Figura 4.15b).

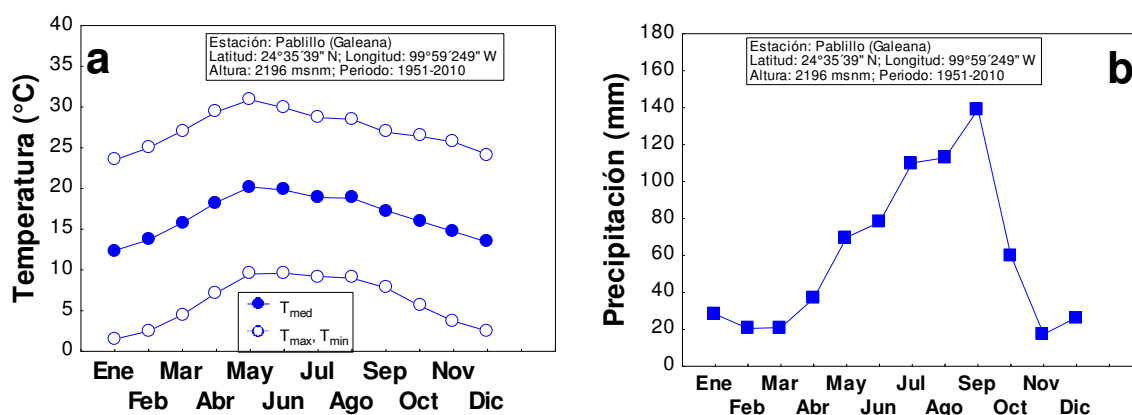


Figura 4.15: Variación mensual de (a) la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y (b) la precipitación (mm) en la estación Pablillo (Galeana, N.L.) para el periodo 1951-2010 (CNA, 2010).

El perfil de suelo estudiado en esta localidad se desarrolla a partir de la Formación Minas Viejas (Oxfordiano–Calloviano). Esta unidad se presenta en este punto como un cuerpo de yeso blanco a gris oscuro con 127 cm de espesor (PAB-07-1 y PAB-07-2; Figura 4.16) y sobre él sobreyacen los siguientes horizontes (Figura 4.17): C con 200 cm (PAB-07-3), B con 16 cm (PAB-07-4) y O con 15 cm (PAB-07-5). De esta forma, el espesor total del perfil es de 358 cm.



Figura 4.16: Afloramiento de yeso de la Formación Minas Viejas en la localidad Pablillo (Galeana, N.L.)

Por otra parte, en este sitio predomina una vegetación de tipo bosque pino-encino, en donde ocurren especímenes de las siguientes especies: Encino de asta (*Quercus rysophylla*), Encino roble (*Quercus polymorpha*), Pino colorado (*Pinus teocote*) y el Pino blanco (*Pinus pseudostrobus*).

4.5.2 Edafología

De acuerdo a sus características, el perfil PAB fue clasificado como Gypsol (USDA, 2003). Como ya se ha comentado, el perfil parte de un cuerpo de yeso sobre el que se desarrolla un suelo con horizontes en los que dominan las texturas francas (Figura 4.17; Tabla 4.6). Con excepción del pH (que disminuye con el desarrollo del perfil de 8.00 a 7.76), no existe un patrón claro de variación en los parámetros edafológicos (Tabla 4.6): conductividad eléctrica (2.26 – 369 $\mu\text{S}/\text{cm}$), carbonatos (0.8 – 18.9 %) y materia orgánica (1.34 – 7.65%).

Tabla 4.6: Resultados del análisis edafológico de las muestras de suelo del perfil PAB

Muestra	Color (base húmeda)	Textura	pH	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Materia orgánica (%)	Carbonatos (%)
PAB-07-5	10YR-2/1	Franco Arenosa	7.76	200	7.65	15.7
PAB-07-4	10YR-6/1	Limosa	7.85	2.26	2.01	0.8
PAB-07-3	10YR-2/1	Franco Arenosa	7.84	369	6.84	18.9
PAB-07-2	7.5YR-3/1	Franco Limosa	8.00	2.27	1.34	3.6



Figura 4.17: Parte superior del perfil de suelo PAB (Gypsolol) en la localidad Pablillo (Galeana, N.L.).

La roca madre está constituida por un cuerpo de yeso que incluye vetillas de carbonato (Figura 4.18). El análisis de difracción de rayos-X ha confirmado esta mineralogía, mostrando además una composición de Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con 85.28% y calcita (CaCO_3) con 14.72% (Figura 4.19).

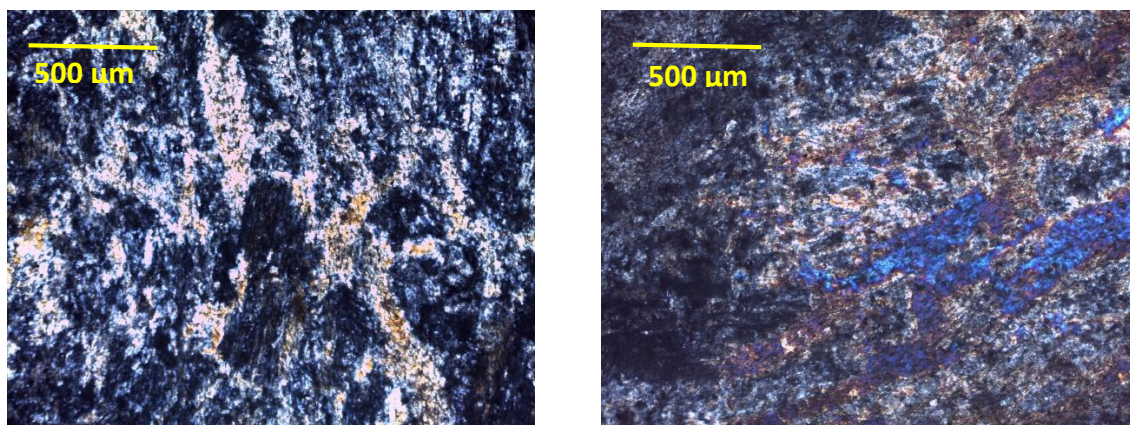


Figura 4.18: Microfotografías (NX; Objetivo 4X) de la roca madre PAB-07-1, correspondiente a un cuerpo de yeso (color azul en las imágenes) con carbonatos de la Formación Minas Viejas.

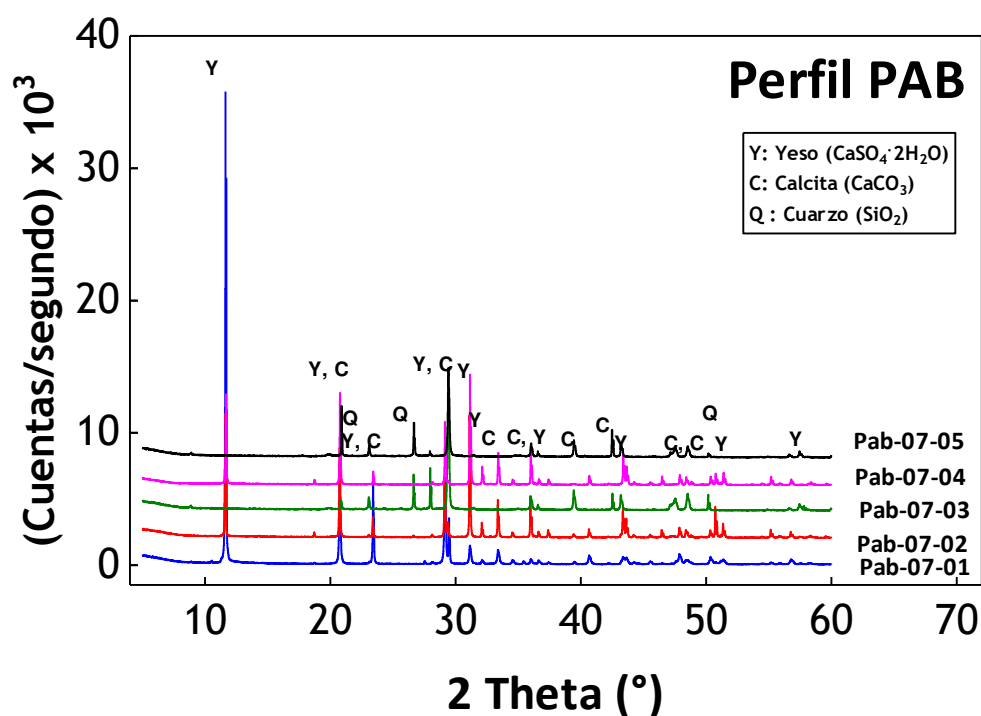


Figura 4.19: Difractograma de los horizontes del perfil PAB (Pablillo; Galeana, N.L.)

4.5.4 Química de elementos traza

La composición química de la roca madre y de los estratos que conforman el perfil PAB se reportan en la Tabla 4.7. Con la excepción de Ba y Sr, la concentración de elementos traza se incrementa con el desarrollo del perfil edafológico. En el caso de Ba, se observa un incremento desde el yeso PAB-07-1 hacia el horizonte PAB-07-3 que muestra un alto contenido de carbonato y materia orgánica, y posteriormente disminuye hacia el horizonte PAB-07-5. Por otra parte, la concentración de Sr disminuye con el desarrollo de estratos.

Tabla 4.7: Resultados de análisis de elementos traza (en ppm) por ICP-MS para el perfil Pablillo (PAB)

Elemento	PAB-07-1	PAB-07-3	PAB-07-5	PAB-07-6 (Raíz)
Li	1.60	34	34.2	1.96
Be	0.08	0.87	1.16	0.10
B	1.81	106	118	30.9
P ₂ O ₅		0.16	0.20	1.04
Sc		4.20	4.63	
TiO ₂	0.01	0.22	0.34	0.02
V	1.78	62.9	83.7	0.55
Cr	5.40	18.5	26.9	7.79
Co	1.53	6.11	7.0	0.76
Ni	14.0	37.0	41.4	52.4
Cu	1.06	13.5	15.3	5.20
Zn	35.3	48.0	60.0	20.0
Ga		5.9	7.8	0.13
Rb	0.08	2.4	50.5	1.6
Sr	662	294	178	86.4
Y		11.8	13.3	
Zr	4.11	57.9	66.5	5.13
Nb	0.35	5.9	9.5	0.53
Mo	0.64	2.38	2.53	0.57
Sn	0.06	0.90	1.29	0.57
Sb	0.04	0.91	1.07	0.13
Cs	0.03	2.0	3.0	0.11
Ba	7.02	300	160	64.1
La	0.24	11.0	12.4	0.47
Ce	0.75	21.6	24.3	1.29
Pr		2.7	3.0	0.06
Nd	0.42	10.6	11.6	0.69
Sm	0.01	2.18	2.42	0.06
Eu	0.02	0.44	0.44	0.04
Tb		0.31	0.34	0.01
Gd	0.09	2.08	2.30	0.14
Dy		1.90	2.10	0.02
Ho	0.01	0.38	0.42	0.02
Er		1.05	1.17	
Yb		1.02	1.17	
Lu		0.15	0.20	
Hf	0.01	1.40	1.62	0.02
Ta	0.01	0.40	0.61	0.01
W	0.09	0.36	0.50	0.09
Tl		0.02	0.05	0.01
Pb	0.55	5.11	5.74	3.61
Th	0.30	3.03	3.70	0.33
U	0.26	2.16	2.42	0.06

Las concentraciones de P₂O₅ y TiO₂ están reportadas en % en peso.

La raíz de encino (PAB-07-6), muestra una retención significativa, expresada como concentración comparada al estrato subyacente, en los siguientes casos: (a) Ni con una concentración de 126%, (b) Sr con una concentración de 49%, (c) Ba con una concentración de 40% y (d) Pb con una concentración de 62%. En el resto de los casos no ocurre una migración de elementos traza hacia la raíz.

4.6 Perfil ASC

4.6.1 Descripción general

Este perfil se ubica en una zona del interior de la Sierra Madre Oriental (La Ascensión, Aramberri, NL: coordenadas UTM: 14R 0398843, 2712565; altitud: 2376 msnm). En esta región, el clima se caracteriza por ser de tipo templado subhúmedo CX', de acuerdo a la clasificación de Koppen (Kottek et al., 2006). La temperatura máxima promedio ($\sim 18^{\circ}\text{C}$) se alcanza entre junio y septiembre, mientras que la mínima promedio es de 10°C entre diciembre y enero (Figura 4.20a). La precipitación anual es de 425 mm, con picos en Agosto (52 mm) y septiembre (93 mm) (Figura 4.20b).

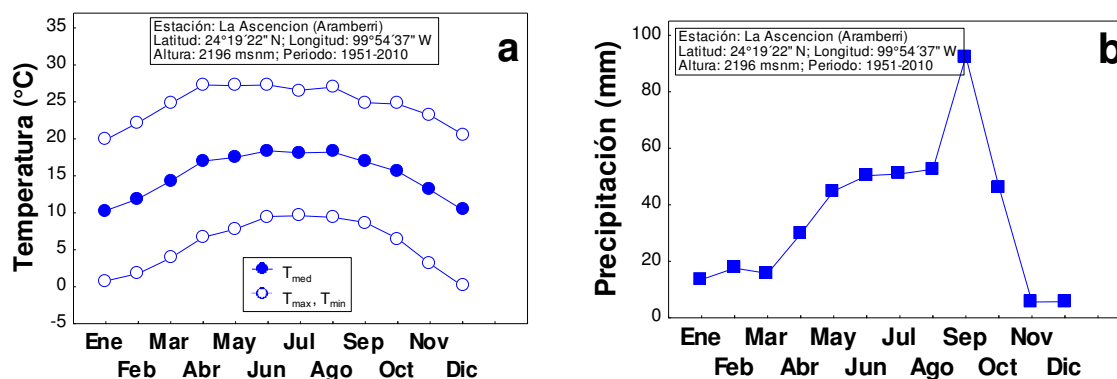


Figura 4.20: Variación mensual de (a) la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y (b) la precipitación (mm) en la estación La Ascensión (Aramberri, N.L.) para el periodo 1951-2010 (CNA, 2010).

El perfil de suelo estudiado en esta localidad se desarrolla a partir de un depósito carbonatado (Cuaternario). Este se presenta como una estructura de coluvión de ~ 180 cm de espesor y un color entre rosado y blanco (ASC-07-1; Figura 4.21). Sobre este cuerpo se desarrollan los siguientes horizontes: B con 40 cm (ASC-07-2), A con 30 cm (ASC-07-3) y O con 30 cm (ASC-07-4). De esta forma, el espesor total del perfil suelo es de 280 cm, considerando el horizonte parental.



Figura 4.21: Afloramiento de coluvión en la localidad La Ascensión (Aramberri, N.L.)

Por otra parte, en este sitio predomina una vegetación de tipo Pino-Encino, en donde ocurren especímenes de las siguientes especies: Encino de asta (*Quercus rysophylla*), Encino blanco (*Quercus laeta*), Encino roble (*Quercus polymorpha*), Pino colorado (*Pinus teocote*) y el Pino blanco (*Pinus pseudostrobus*).

4.6.2 Edafología

De acuerdo a sus características, el perfil ASC fue clasificado como Rendzina (USDA, 2003). Como ya se ha comentado, el perfil parte de un cuerpo de coluvión sobre el que se desarrolla un suelo con tres horizontes cuya textura cambia de franca a arcillosa (Figura 4.22; Tabla 4.8). Se observa una disminución en pH (7.94 a 7.30) y un incremento en conductividad (115.2 a 353.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y materia orgánica (0.53 a 6.98%) con el desarrollo del perfil. Los carbonatos no muestran un patrón claro de evolución.

Tabla 4.8: Resultados del análisis edafológico de las muestras de suelo del perfil ASC

Muestra	Color (base húmeda)	Textura	pH	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Materia orgánica (%)	Carbonatos (%)
ASC-07-4	2.5Y-2.5/1	Arcillosa	7.30	353.0	6.98	1.0
ASC-07-3	5YR-2.5/1	Franco Arcillosa	7.67	102.4	3.22	3.5
ASC-07-2	10YR-3/6	Arcillo Limosa	7.74	138.5	1.61	2.4
ASC-07-1	5YR-7/3	Franca	7.94	115.2	0.53	1.0



Figura 4.22: Estructura de perfil de suelo ASC (Rendzina) en la localidad La Ascención, que incluye el depósito de coluvión/horizonte C (ASC-07-1), un horizonte B (ASC-07-2), un horizonte A (ASC-07-3) y un horizonte O (ASC-07-4).

4.6.3 Mineralogía

El análisis de difracción de rayos-X (Figura 4.23) indica que el depósito de coluvión se encuentra constituido por cuarzo (SiO_2 , 10.84%) + calcita (CaCO_3 , 89.16%). Esta mineralogía se conserva en los estratos de suelo, aunque acompañados por illita y yeso.

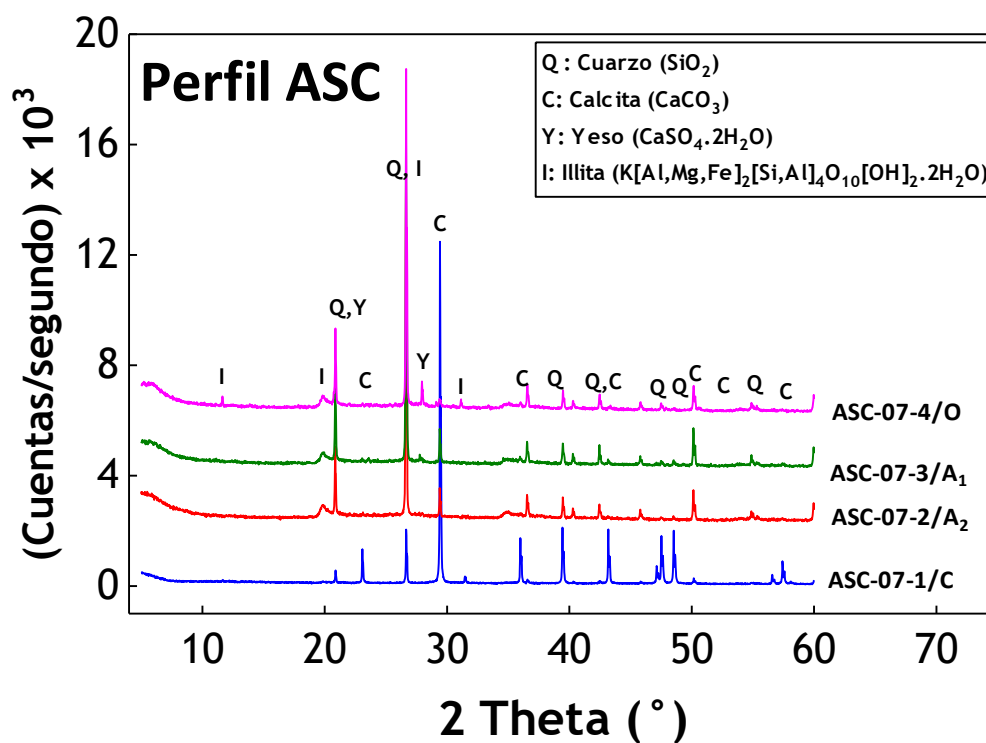


Figura 4.23: Difractograma de los horizontes que conforman el perfil ASC (La Ascensión).

4.6.4 Química de elementos traza

En la Tabla 4.9 se presenta la composición química en elementos traza de los horizontes edafológicos del perfil ASC. En términos generales, con excepción el Sr, la concentración se incrementa desde el coluvión ASC-07-1 al horizonte ASC-07-3.

Por otra parte, el análisis de una raíz (ASC-07-5), de encino ha revelado la retención significativa de los siguientes elementos (retención = $[\text{raíz/estrato}] \cdot 100$): (a) Ba con una concentración de 67%, (b) Pb con una concentración de 146% y (c) Ni con una concentración de 117%.

Tabla 4.9: Resultados de análisis de elementos traza (en ppm) por ICP-MS para el perfil Ascensión (ASC)

Elemento	ASC-07-1	ASC-07-3	ASC-07-5 (Raíz)
Li	11.98	50.56	2.07
Be	0.58	3.16	0.08
B	7.64	46.5	31.0
P ₂ O ₅	0.01	0.13	0.19
Sc	3.30	15.7	
TiO ₂	0.16	0.73	0.02
V	49.4	175	0.09
Cr	22.11	74.22	11.4
Co	10.9	28.7	0.88
Ni	45.5	80.9	94.8
Cu	19.6	37.9	6.48
Zn	64.8	147	83.3
Ga	3.63	21.2	0.04
Rb	13.5	80.4	3.93
Sr	146	50.0	28.8
Y	16.6	74.8	
Zr	45.0	208	4.63
Nb	3.24	24.5	0.43
Mo	1.30	2.48	0.60
Sn	0.59	3.41	0.69
Sb	1.23	2.71	0.07
Cs	1.94	8.46	0.10
Ba	85.8	448	13.8
La	11.3	54.5	0.32
Ce	13.3	80.8	0.90
Pr	2.24	12.5	0.02
Nd	9.34	45.7	0.55
Sm	1.91	9.71	0.04
Eu	0.41	1.80	0.02
Tb	0.32	1.60	0.00
Gd	2.17	10.0	0.12
Dy	2.02	10.0	
Ho	0.43	2.03	0.01
Er	1.20	5.86	
Yb	1.10	5.6	
Lu	0.70	0.80	
Hf	0.97	5.8	
Ta	0.21	1.55	0.01
W	0.35	1.30	0.10
Tl	0.03	0.90	0.03
Pb	5.95	29.8	1.71
Th	1.80	11.1	0.30
U	1.09	3.77	0.04

Las concentraciones de P₂O₅ y TiO₂ están reportadas en % en peso.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Perfil FCF

El perfil corresponde a un litosol y fue levantado en el campus de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, N.L. (Figura 4.1; coordenadas UTM: 14R 0446949, 2741000; altitud: 370 msnm). El suelo se ha originado a partir de una lutita calcárea de la Formación Méndez con evidencia de un intemperismo intenso. El espesor total del perfil es de 128 cm (Figura 4.4), aunque con un horizonte B de 60 cm al que le sobreyacen estratos poco desarrollados tipo AB, A, B y A, como es de esperarse en este tipo de suelos en ambientes semi-áridos (Deckers *et al.*, 1998). La repetición de una capa tipo B podría estar relacionada con un nuevo desarrollo edafológico como resultado de un proceso de inundación. Los horizontes están constituidos por tres minerales principales (Figura 4.5): calcita (24-60%), cuarzo (20-47%) y montmorillonita (18-32%).

No se observa un patrón de variación consistente de los parámetros edafológicos (Tabla 4.1). Sin embargo, el intervalo de pH (ligeramente alcalino) es el esperado en general para litosoles (6.4 – 8.3; Batjes, 1995). La conductividad eléctrica de los horizontes es relativamente baja (66-91 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo que implica una movilidad restringida de iones. Este fenómeno probablemente esté relacionado a la presencia de montmorillonita e illita, minerales arcillosos que tienen capacidad de retención de iones. Como es de esperarse en un litosol (Deckers *et al.*, 1998), con la excepción del horizonte FCF-06-3 (~7%), los horizontes que conforman el perfil muestran un bajo contenido de materia orgánica (< 2%). Es probable que los horizontes superiores FCF-06-1 y FCF-06-0 representen un nuevo desarrollo edafológico posterior a un proceso de inundación previo, representado por el horizonte FCF-06-2. Finalmente, la vegetación que se desarrolla sobre este perfil es de tipo matorral submontano.

5.2 Perfil LCR

Este perfil de regosol fue levantado en la localidad Las Crucitas, Linares, N.L. (Figura 4.1; coordenadas UTM: 14R 0423094, 2736922; altitud: 621 msnm). El suelo se generó a partir de estratos de carbonato muy alterados de la Formación San Felipe. Su espesor es de 280 cm y está constituido por una secuencia de horizontes de tipo C y A (en donde dominan las texturas francas; Figura 4.8). La difracción de rayos-X (Figura 4.9) indica un arreglo de minerales de tipo cuarzo + albita + calcita + montmorillonita + illita. La evaluación cuantitativa del contenido de especies minerales en los difractogramas (con base a la comparación del número de cuentas por segundo entre los picos principales asociados a cada mineral) muestra un

incremento de minerales arcillosos (montmorillonita + illita; 39 a 44%) y de los carbonatos (15 a 26%) hacia la cima. Se destaca un alto contenido de materia orgánica en el horizonte superior con ~4.2% (Tabla 4.2).

El perfil no muestra un patrón de variación de los parámetros edafológicos de base a cima (Tabla 4.2). Sin embargo, un pH ligeramente básico (7.3-7.7) y una conductividad eléctrica relativamente baja (79 – 126 $\mu\text{S}/\text{cm}$) son comparables a lo esperado en regosoles (Kabata-Pendias, 2011). La comparación en composición química de elementos traza entre la roca madre LCR-07-1 y los horizontes LCR-07-2 y LCR-07-4 (Figura 5.1) indica una alta correlación entre la roca y el suelo (pendiente ~1), así como una retención marcada de todos los elementos, con excepción de Sr. Este fenómeno puede estar relacionado con un incremento en el contenido de minerales arcillosos (montmorillonita + illita) que pueden retener los elementos traza. Este comportamiento se ha reportado para suelos de ambientes semi-áridos y en proceso de alcalinización (Deckers et al., 1998).

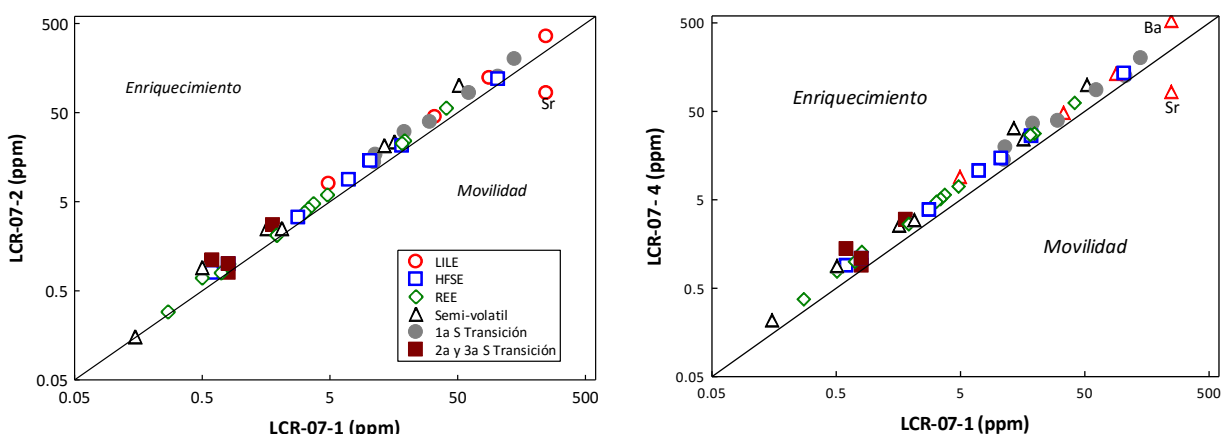


Figura 5.1: Comparación directa de la química de la roca madre LCR-07-1 con los horizontes de suelo LCR-07-2 y LCR-07-4, considerando diversos tipos de elementos (Abreviaturas: LILE = litófilos; HFSE = de campo electrostático fuerte, REE = lantánidos).

De acuerdo a la relación de elementos incompatibles Th/Sc y Zr/Sc , la roca y los horizontes de suelo muestran una química comparable a la Corteza Continental Superior (Figura 5.2). En el gráfico no es evidente un proceso de enriquecimiento de elementos inmóviles (asociada a una variación en la relación Zr/Sc ; Rollinson, 1993), lo que indica un suelo en desarrollo.

Por otra parte, los patrones de lantánidos (REE) normalizados a condrita (Rollinson, 1993) para la roca madre y los suelos se caracterizan por mostrar: (a) un ligero enriquecimiento en REE ligeros ($[\text{La}/\text{Yb}]_N = 6.8-7.6$), (b) una pequeña anomalía negativa de Eu y (c) un patrón plano para REE pesadas. El mayor enriquecimiento de lantánidos se observa en el horizonte LCR-07-4 con $\text{La}_N \sim 88X$ con respecto a condrita. Una forma similar de patrones entre la roca y los suelos asegura una conexión genética.

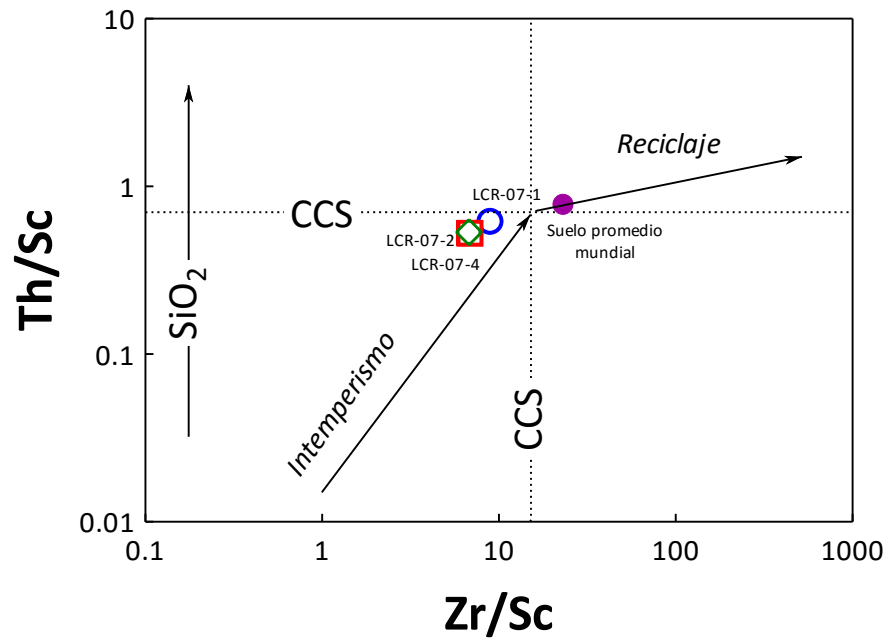


Figura 5.2: Diagrama de variación de relaciones de elementos inmóviles Th/Sc – Zr/Sc para la roca madre LCR-07-1 y los horizontes de suelo LCR-07-2 y LCR-07-4. CCS = Corteza Continental Superior.

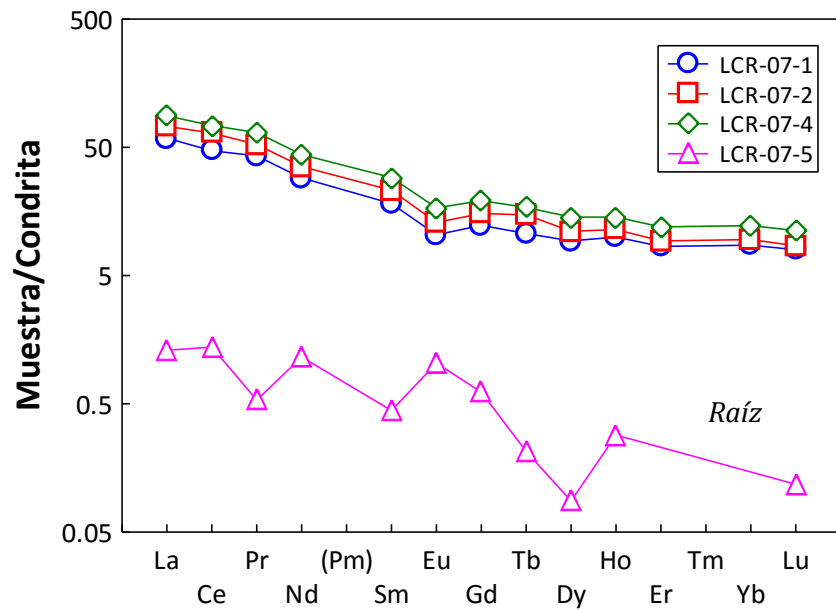


Figura 5.3: Patrones de lantánidos, normalizados a condrita, de la roca madre LCR-07-1, los suelos LCR-07-2 y LCR-07-4, y la raíz de encino LCR-07-5.

Por otra parte, los diagramas de metales de transición normalizados a condrita para la roca madre y suelo (Figura 5.4) muestran una forma similar, con un enriquecimiento marcado en Ti (con concentraciones normalizadas ~5.9-8.8X con respecto a condrita), un descenso en Cr a Ni, y finalmente un incremento en Cu y Zn.

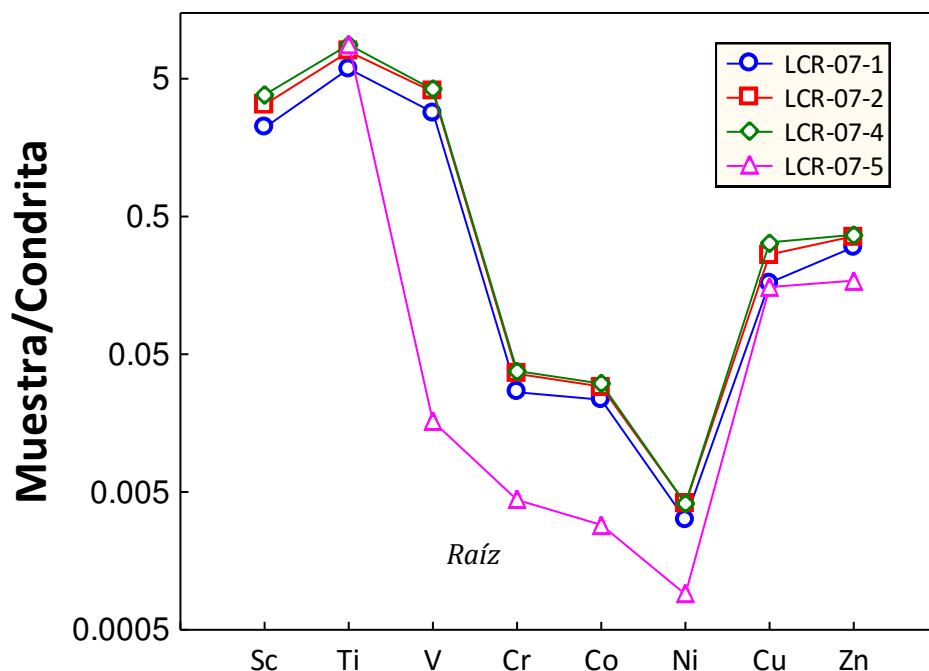


Figura 5.4: Patrones de metales de transición, normalizados a condrita, de la lutita LCR-07-1, los suelos LCR-07-2 y LCR-07-4, y la raíz de encino LCR-07-5.

El proceso de movilidad de los elementos traza por grupo puede ser evaluado considerando la inmovilidad del titanio (TiO_2) en el sistema. Se utilizó el parámetro $D_i = [TiO_{2s}/C_{is}]/[TiO_{2rm}/C_{irm}]$, en donde el subíndice i indica un elemento traza, s un horizonte de suelo y rm la roca madre. En el caso del perfil LCR, este parámetro (Figura 5.5) ha permitido confirmar la inmovilidad de la mayor parte de los elementos traza considerados en el análisis, con excepción de $D_{Sr} \sim 4$, $D_{P205} \sim 2$ y $D_{Mo} \sim 2$.

Sobre el perfil de suelo LCR se desarrolla vegetación asociada a una zona de transición entre matorral submontano y bosque de pino-encino. La raíz de encino (LCR-07-5) muestra una composición de lantánidos aproximadamente menor a la condrita (Figura 5.3), lo que refleja una incorporación limitada como resultado del desarrollo incipiente tanto del suelo como de la planta. Su patrón de elementos de transición, normalizado a condrita (Figura 5.4), es comparable al de la roca madre y los suelos, aunque con una menor concentración. Cabe destacar la fuerte retención Ba, Sr y B en la raíz (Tabla 4.3).

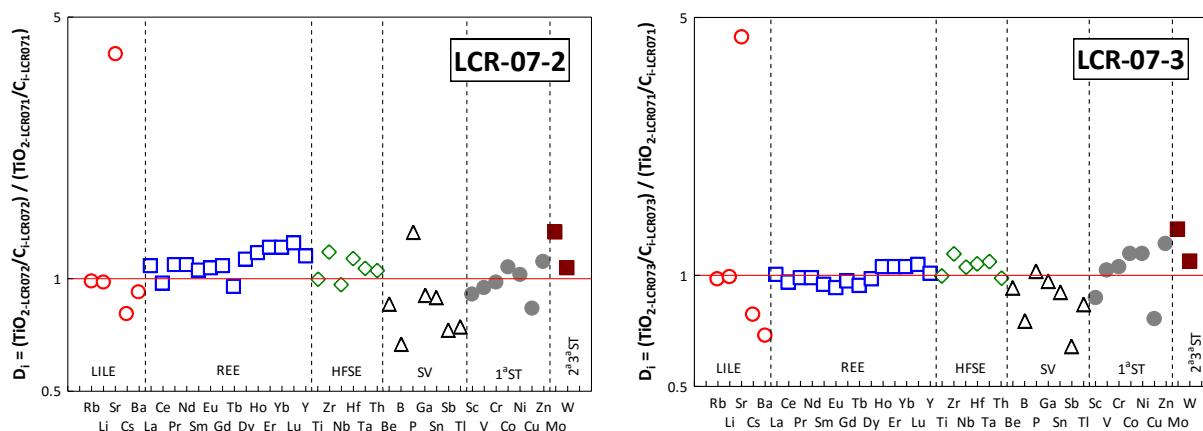


Figura 5.5: Variación del parámetro D_i , de acuerdo al tipo de elemento traza, para los horizontes de suelo LCR-07-2 y LCR-07-4.

5.3 Perfil TAP

Este perfil de regosol (espesor total ~ 285 cm) fue levantado en la localidad Tapia (Iturbide, N.L.: coordenadas UTM: 14R 0406026, 2735890; altitud: 1646 msnm). Los horizontes de suelo se desarrollan a partir de una arenisca fragmentada y alterada de la Formación Taraises, mostrando una textura franca o arcillosa. El análisis de difracción de rayos-X ha revelado como minerales principales en la roca y el suelo a cuarzo (57 a 69%), albita (21 a 36%) y montmorillonita (2.6 a 5.2%). Es importante señalar que la muestra TAP-07-3 contiene una pequeña proporción de calcita (4%), ausente en el resto de las muestras.

En contraste con el caso previo, con la generación de horizontes se observa (Tabla 4.4) una disminución en el pH (7.9 a 5.9, este último francamente ácido), en la conductividad eléctrica (73.6 a 32.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y en el contenido de carbonatos (26.7 a 0.7%). La cantidad de materia orgánica en el perfil varía de 1.0 a 3.8%. La comparación composicional entre la roca madre TAP-07-1 y los suelos TAP-07-3 y TAP-07-4 (Figura 5.6) ha revelado la retención de los elementos traza en estos horizontes, con excepción del P_2O_5 . Como ya se ha comentado, esta observación ya ha sido reportada para suelos que incluyen minerales arcillosos y materia orgánica en regiones semi-áridas (Murray *et al.*, 2004).

La derivación del perfil de suelo TAP de un material cortical ya reciclado (arenisca TAP-07-1) es evidente en la Figura 5.7, en donde las muestras presentan relaciones Th/Sc ($= 0.9 - 3.0$) más altas que las que caracterizan a la Corteza Continental Superior y del suelo promedio mundial.

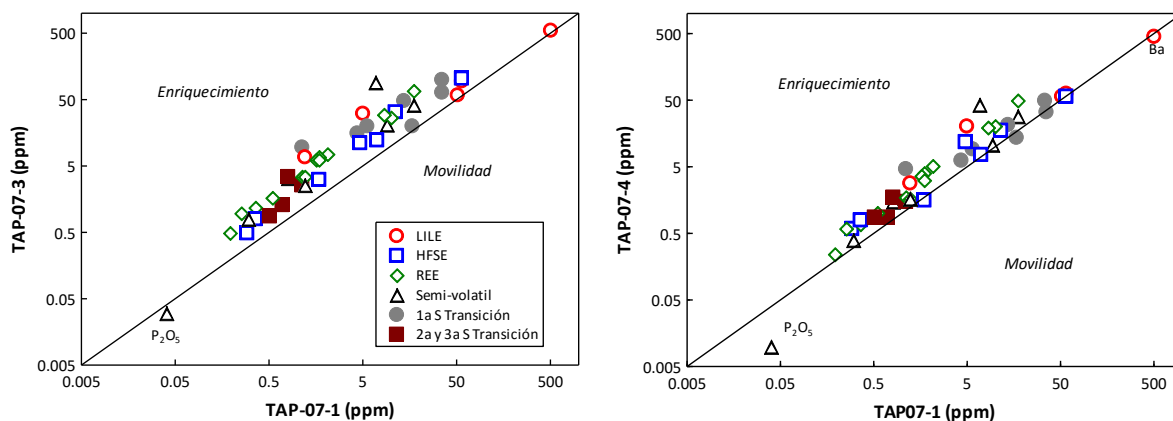


Figura 5.6: Comparación directa de la química de la roca madre TAP-07-1 con los horizontes de suelo TAP-07-3 y TAP-07-4, considerando diversos tipos de elementos (Abreviaturas: LILE = litófilos; HFSE = de campo electrostático fuerte, REE = lantánidos).

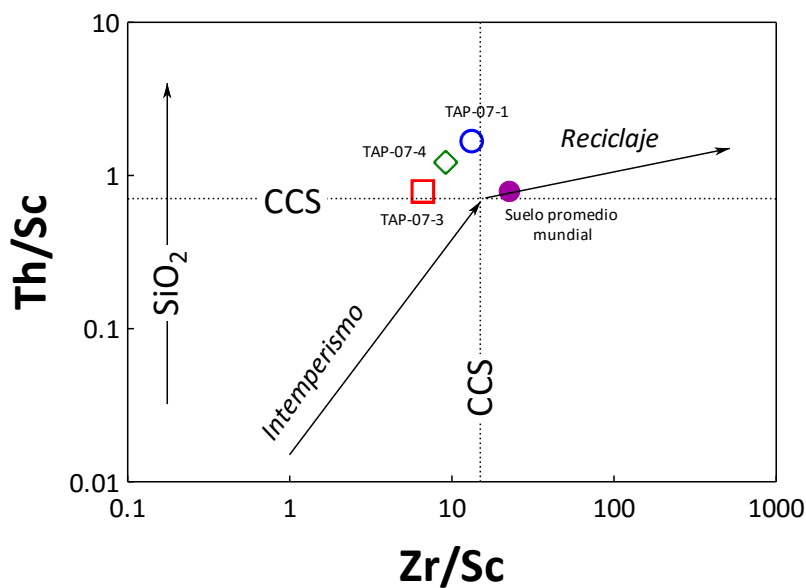


Figura 5.7: Diagrama de variación de relaciones de elementos inmóviles Th/Sc – Zr/Sc para la roca madre TAP-07-1 y los horizontes de suelo TAP-07-3 y TAP-07-4. CCS = Corteza Continental Superior.

Por otra parte, el patrón de lantánidos normalizados a condrita de la arenisca TAP-07-1 se encuentra enriquecido en elementos ligeros ($La_N = 29X$; $[La/Yb]_N = 5.5$), no presenta anomalía de Eu y es cuasi-horizontal para pesados. Esta morfología es también observada para las muestras de suelo TAP-07-3 y TAP-

07-4, aunque con un incremento en las concentraciones (por ejemplo $La_N \sim 64-82X$ y $[La/Yb]_N = 5.2-8.3$) y que es indicativo de retención con la evolución del proceso edafológico.

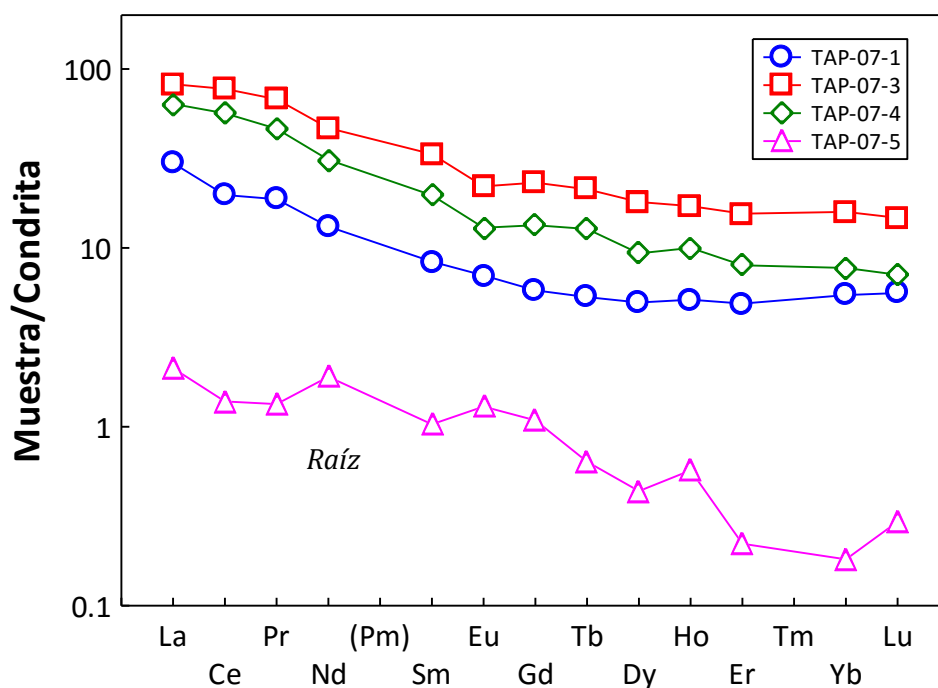


Figura 5.8: Patrones de lantánidos, normalizados a condrita, de la roca madre TAP-07-1, los suelos TAP-07-3 y TAP-07-4, y la raíz de encino TAP-07-5.

En el caso de los metales de transición, las muestras del perfil TAP (roca madre y suelos) desarrollan los típicos patrones normalizados a condrita en forma de “V” (Figura 5.9; Rollinson, 1993). Se observa un incremento de concentración en metales de la roca madre al suelo, siendo el enriquecimiento máximo en titanio normalizado de $\sim 5.9X$ con respecto a una fuente condrita.

De acuerdo al parámetro D_i , basado en TiO_2 como una especie inmovil, en el paso de TAP-07-1 a TAP-07-3 ocurre una movilización aunque limitada de Cs, Ba, P_2O_5 y Cu (Figura 5.10a). La evolución a TAP-07-4 está acompañada por un incremento en movilización de LILE (Rb, Sr, Ba), REE pesadas, HFSE (Zr, Hf, Th), semi-volátiles y metales de transición (Figura 5.10b).

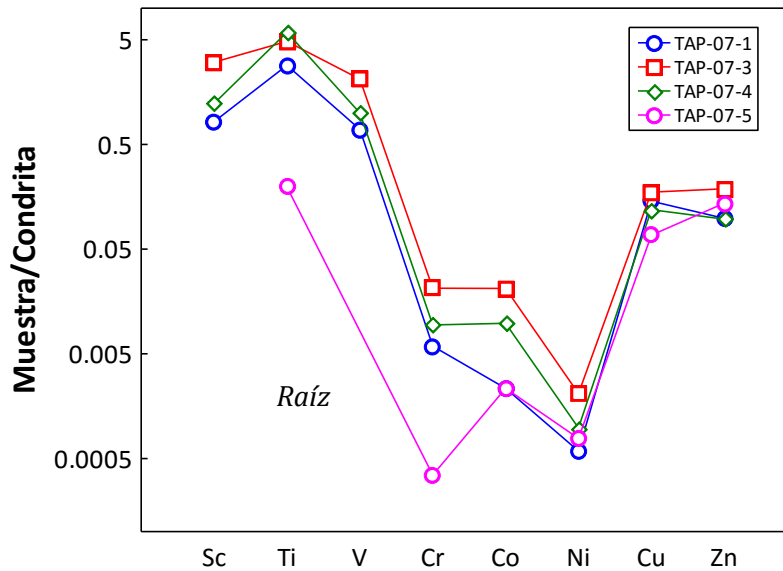


Figura 5.9: Patrones de metales de transición, normalizados a condrita, de la arenisca TAP-07-1, los suelos TAP-07-3 y TAP-07-4, y la raíz de encino TAP-07-5.

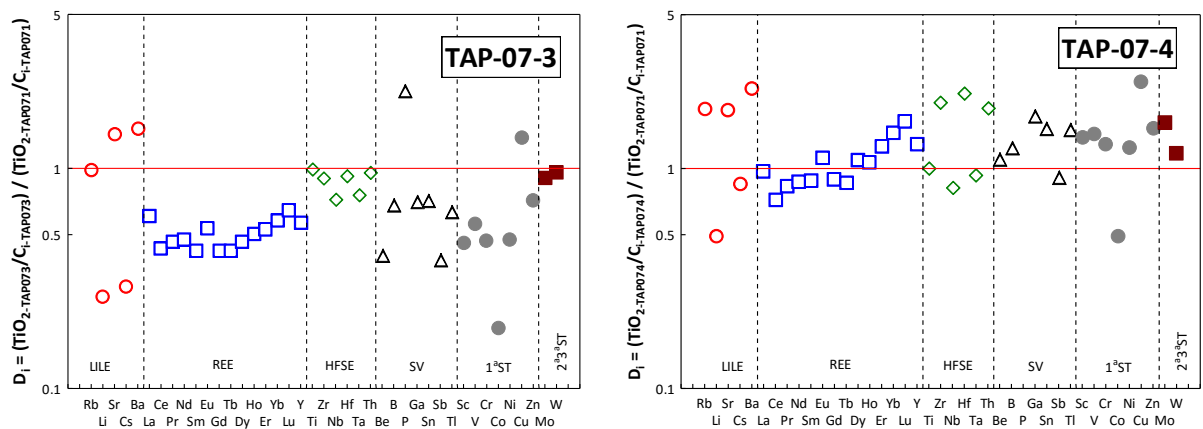


Figura 5.10: Variación del parámetro D_i , de acuerdo al tipo de elemento traza, para los horizontes de suelo TAP-07-3 y TAP-07-4.

Sobre el perfil de suelo TAP se desarrolla vegetación asociada a una zona de bosque de pino-encino. La raíz de encino TAP-07-5 muestra una composición de lantánidos ligeros ligeramente superior a la condritica ($La_N = 2.1$) y va disminuyendo con el incremento de Z ($[La/Yb]_N = 11.8$; Figura 5.8). Su patrón de elementos de transición, normalizado a condrita (Figura 5.9), es comparable al de la roca madre y los suelos. La concentración de Cu, Ni y Zn en la raíz llega a ser comparable con la observada en los horizontes. Cabe destacar además la fuerte retención de B, Sr y Ba en la raíz TAP-07-5 (Tabla 4.5).

5.4 Perfil PAB

El perfil PAB corresponde a un gypsisol y fue levantado en la localidad de Pablillo, Galeana, N.L. (coordenadas UTM: 14R 0397347, 2716947; altitud: 2196 msnm). Los horizontes de suelo (en los que domina una textura franca) se han generado a partir de un cuerpo de yeso, correspondiente a la Formación Minas Viejas. El espesor total del perfil es de ~358 cm. El análisis de difracción de rayos-X (Figura 4.17) indica un arreglo de yeso (85%) y calcita (15%) en la roca madre PAB-07-1. Esta combinación, con la incorporación de cuarzo, es observada en los horizontes PAB-07-2 (roca madre alterada) y PAB-07-4 (yeso, 90-93%; calcita 6.0-6.7%). Sin embargo, la mineralogía de los horizontes PAB-07-3 y PAB-07-5 contrastan notablemente, ya que el arreglo ahora corresponde a calcita (69 y 93%) y cuarzo (2 y 23%), acompañados de albita e illita.

Las variaciones en mineralogía entre el arreglo de minerales en los estratos tienen por consecuencia que no exista un patrón de comportamiento en los parámetros edafológicos (Tabla 4.6). Sin embargo, es evidente un pH básico (7.7-8.0) para todo el conjunto. Un alto contenido de materia orgánica (6.8-7.7%) y una alta conductividad (200-369 $\mu\text{S}/\text{cm}$) está ligada a la presencia de carbonatos en los estratos.

En comparación a la geoquímica del yeso origen PAB-07-1, las muestras de suelo PAB-07-3 y PAB-07-5 presentan un alto enriquecimiento en todos los elementos traza, con excepción del Sr (Figura 5.11). En este caso, la clave de la retención pudiera ser la materia orgánica presente en estos horizontes.

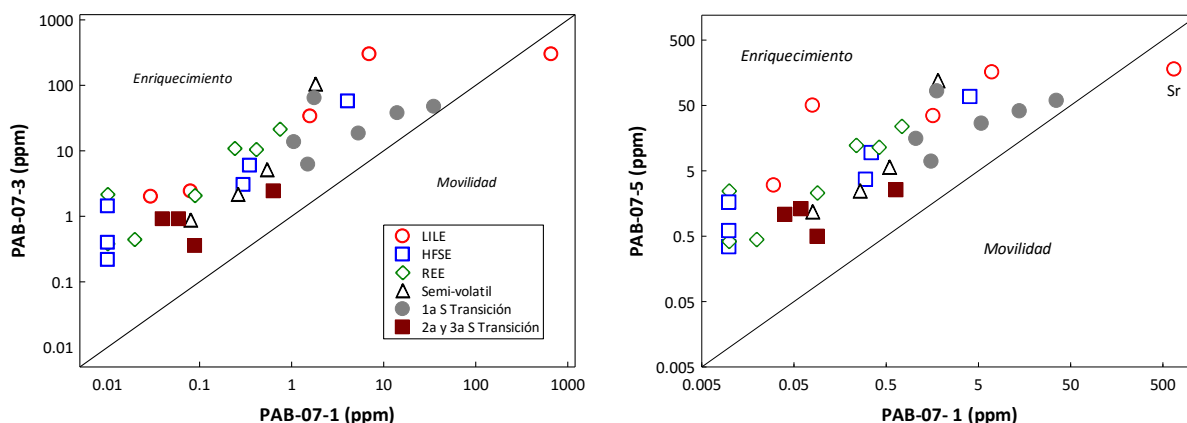


Figura 5.11: Comparación directa de la química de la roca madre PAB-07-1 con los horizontes de suelo PAB-07-3 y PAB-07-5, considerando diversos tipos de elementos (Abreviaturas: LILE = litófilos; HFSE = de campo electrostático fuerte, REE = lantánidos).

Las relaciones Th/Sc y Zr/Sc para las muestras carbonatadas del perfil PAB indican una afinidad a la Corteza Continental Superior y una composición cercana al promedio mundial de suelo (Figura 5.12). Como en casos previos, no existe evidencia de un reciclaje importante de elementos inmóviles por lo que se puede asumir un desarrollo edafológico reciente.

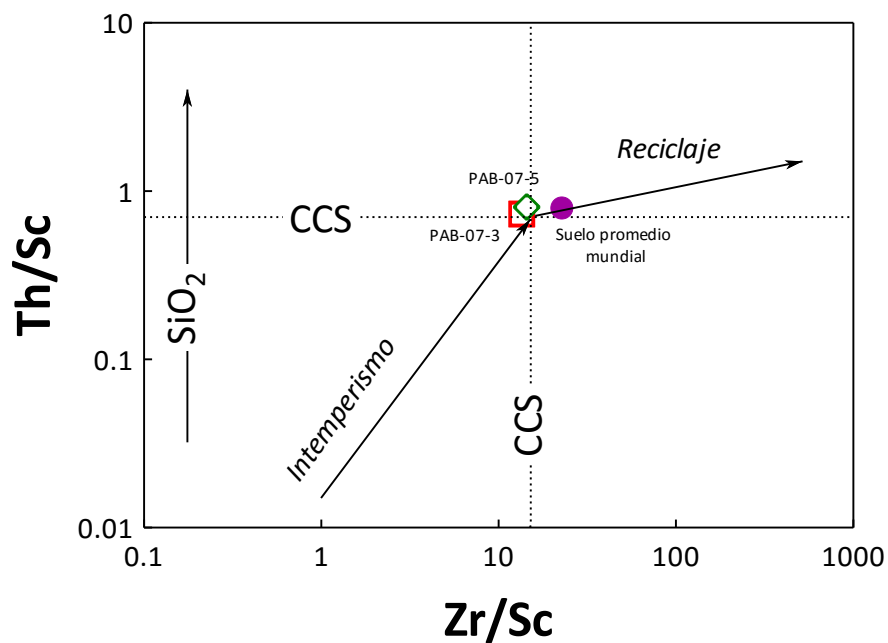


Figura 5.12: Diagrama de variación de relaciones de elementos inmóviles Th/Sc – Zr/Sc para la roca madre PAB-07-1 y los horizontes de suelo PAB-07-3 y PAB-07-5. CCS = Corteza Continental Superior.

Por otra parte, el diagrama de lantánidos normalizados a condrita del yeso PAB-07-1 (Figura 5.13) indica: (a) una concentración baja para este grupo de elementos ($La_N = 0.7$), (b) un patrón ligeramente enriquecido en ligeros, (c) una anomalía negativa de Eu, y (d) un descenso en concentración con el aumento de Z para pesados. La anomalía negativa de Eu se ha asociado a la fraccionación de plagioclasa (Rollinson, 1993). Aunque la morfología podría considerarse comparable, el patrón del yeso contrasta en concentración con respecto a los horizontes carbonatados PAB-07-3 y PAB-07-5. Estos muestran un $La_N = 33-37$ y el enriquecimiento de ligeros está dado por $[La/Yb]_N = 7.1-7.2$.

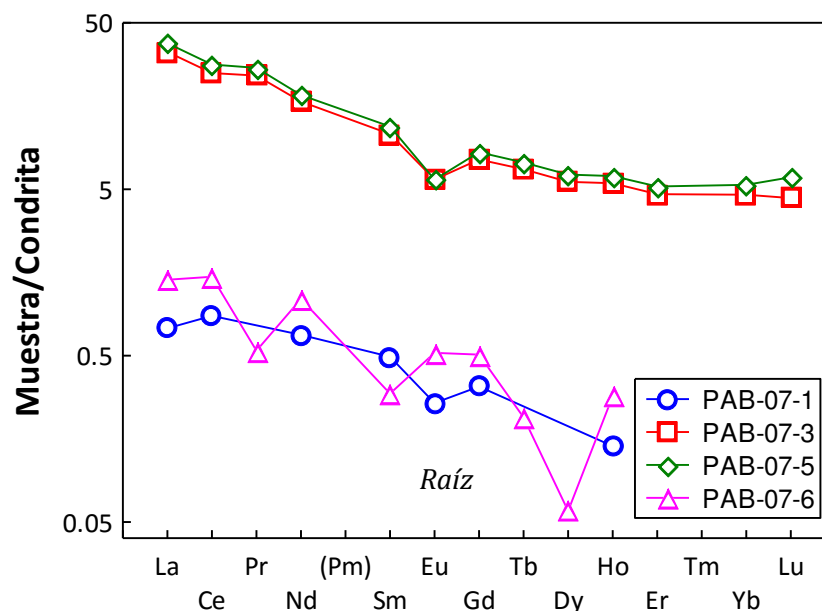


Figura 5.13: Patrones de lantánidos, normalizados a condrita, de la roca madre PAB-07-1, los suelos PAB-07-3 y PAB-07-5, y la raíz de encino TAP-07-6.

En cuanto a los metales de transición, el grupo de muestras bajo estudio muestra patrones comparables en forma a los observados en otros perfiles (Figura 5.14). Sin embargo, el yeso PAB-07-1 tiene contenidos (por ejemplo, $Ti_N \sim 0.10$) de una magnitud similar o menores a los observados en la raíz de encino PAB-07-6 ($Ti_N \sim 0.19$). Los estratos con mayor contenido de carbonatos (PAB-07-3 y PAB-07-5) se encuentran enriquecidos en metales de transición (por ejemplo, $Ti_N = 2.1-3.3$).

Los cambios en la mineralogía entre el yeso y los horizontes con alto carbonato (PAB-07-3 y PAB-07-5) se reflejan también en la movilidad de los elementos traza (tomando como referencia al TiO_2). En la Figura 5.15 es evidente la movilidad de Zr, Nb y Th (HFSE), de Be y Sb (semi-volátiles) y de Cu durante el desarrollo del estrato PAB-07-3. Con la evolución hacia la capa PAB-07-5, al grupo de elementos móviles se incorporan los LILE Sr y Ba, los lantánidos entre Ce y Eu, y el Tl.

Como se ha señalado, en la localidad Pablillo la vegetación típica corresponde a bosque de pino-encino. La raíz de encino PAB-07-6 se caracteriza por un patrón de lantánidos en zig-zag de relativa baja concentración con respecto a los suelos carbonatados y con magnitudes parecidas a las observadas en el yeso origen (Figura 5.13). La correspondencia en composición de la raíz con el yeso es aún más clara en el patrón de metales de transición normalizado a condrita (Figura 5.14).

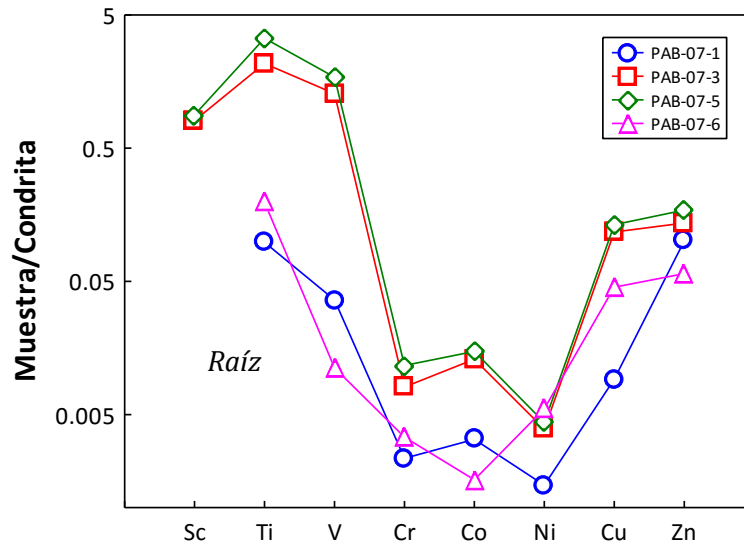


Figura 5.14: Patrones de metales de transición, normalizados a condrita, del yeso PAB-07-1, los suelos PAB-07-3 y PAB-07-5, y la raíz de encino PAB-07-6.

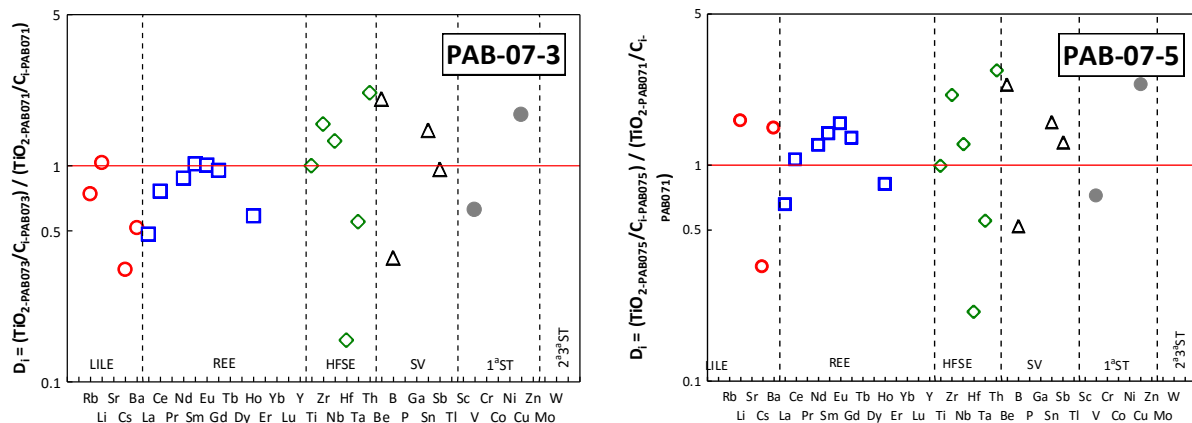


Figura 5.15: Variación del parámetro D_i , de acuerdo al tipo de elemento traza, para los horizontes de suelo PAB-07-3 y PAB-07-5.

5.5 Perfil ASC

El perfil ASC fue levantado en la localidad La Ascensión, Aramberri, N.L. (coordenadas UTM: 14R 0398843, 2712565; altitud: 2376 msnm). Esta rendzina o calcisol (espesor total ~280 cm; textura franca a arcillosa; Figura 4.20) se desarrolló sobre un depósito de coluvión. Este último se encuentra constituido por una mezcla de calcita (89.16%) y cuarzo (10.84%). Este arreglo de minerales se observa a través de los horizontes

del perfil, aunque incluyendo además illita y yeso. La evolución edafológica se caracteriza por una disminución en pH (7.9 a 7.3) y por un incremento en conductividad (115.2 a 353.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y de materia orgánica (0.53 a 6.98%). La comparación entre el horizonte ASC-07-3 con respecto al depósito de coluvión ASC-07-1 indica una fuerte retención en todos los elementos traza, independientemente de su tipo, con excepción del Sr (Figura 5.16). Este comportamiento podría estar ligado con la acumulación de minerales arcillosos y materia orgánica.

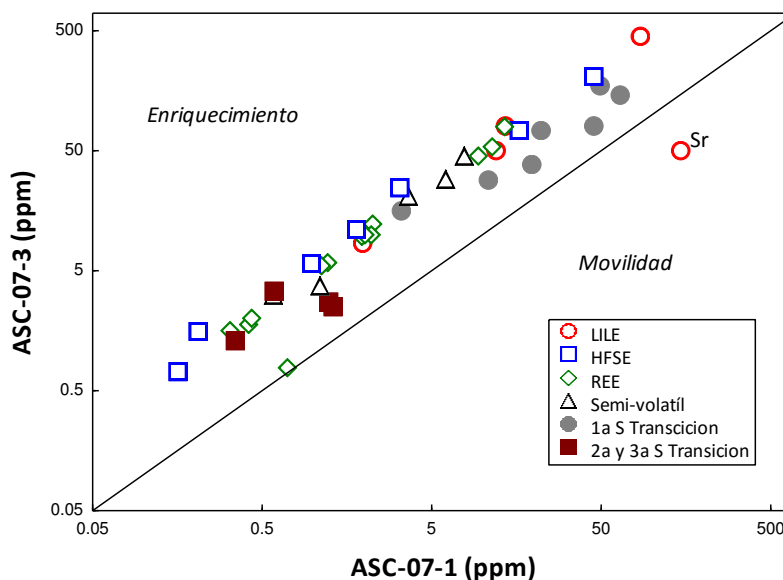


Figura 5.16: Comparación directa de la química del depósito ASC-07-1 con el horizonte de suelo ASC-07-3, considerando diversos tipos de elementos (Abreviaturas: LILE = litófilos; HFSE = de campo electrostático fuerte, REE = lantánidos).

Por otra parte, y como en los casos anteriores, las relaciones de elementos inmóviles Th/Sc-Zr/Sc (Figura 5.17) indican composiciones de roca madre y suelo del perfil ASC comparables al promedio mundial de suelo y a la mostrada por la corteza continental superior.

Los diagramas de lantánidos, normalizados a condrita, para ASC-07-1 y ASC-07-3 se caracterizan por mostrar (Figura 5.18): (a) un enriquecimiento en lantánidos ligeros ($[\text{La}/\text{Yb}]_N = 6.6\text{-}6.8$), (b) pequeñas anomalías negativas en Ce y Eu, y (c) un patrón plano para lantánidos pesados. La anomalía negativa de Ce (que no siempre es observable) es típica de aguas marinas (Rollinson, 1993), ambiente en el que se depositaron las calizas cretácicas de la Sierra Madre Oriental. La anomalía negativa de Eu se ha explicado por fraccionación de plagioclasa (Rollinson, 1993).

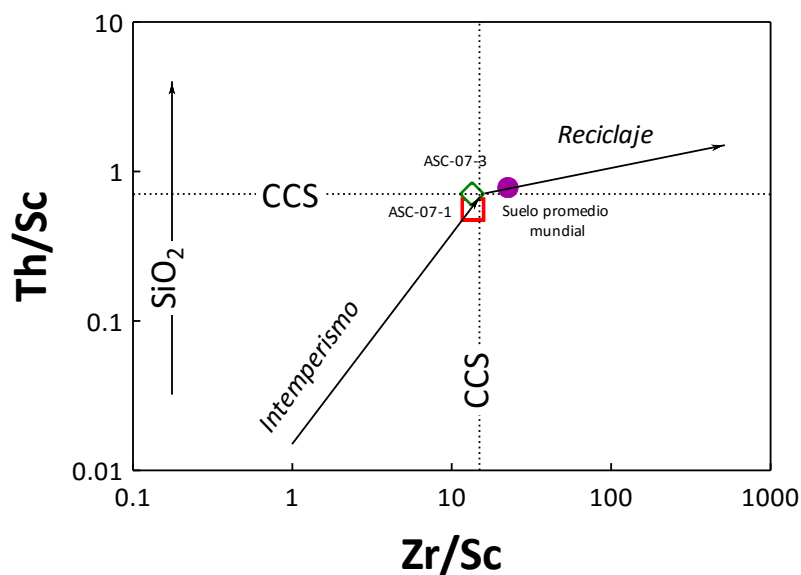


Figura 5.17: Diagrama de variación de relaciones de elementos inmóviles Th/Sc – Zr/Sc para el depósito de coluvión ASC-07-1 y el horizonte de suelo ASC-07-3. CCS = Corteza Continental Superior.

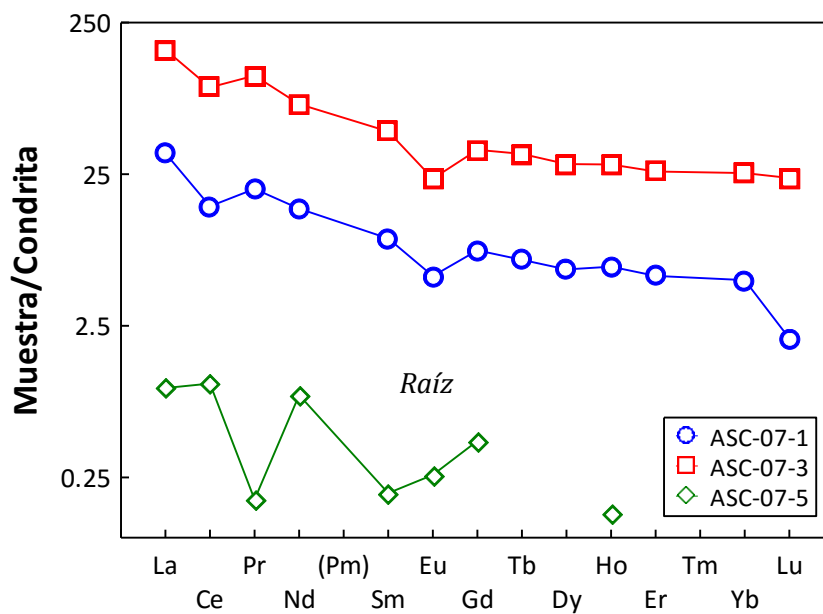


Figura 5.18: Patrones de lantánidos, normalizados a condrita, del depósito de coluvión ASC-07-1, el suelo ASC-07-3 y la raíz de encino ASC-07-5.

Las muestras del perfil ASC presentan diagramas de metales de transición, normalizados a condrita, con el empobrecimiento en Cr, Co y Ni (Figura 5.19). El enriquecimiento máximo lo muestra el TiO_2 con $\sim 5\text{X}$ con respecto a la condrita. Por otro lado, considerando la inmovilidad de Ti durante el desarrollo del suelo, el parámetro D_i (Figura 5.20) indica una movilidad restringida salvo por casos específicos como Sr, Lu, Sb y el grupo de metales (con excepción del Sc).

En la localidad de la Ascensión se desarrolla una vegetación de pino-encino. El análisis químico de la raíz de un encino que se ha desarrollado sobre la rendzina indica bajas concentraciones de lantánidos (Figura 5.18) y de metales de transición (Figura 5.19) con respecto al suelo y el depósito de coluvión del que se ha generado. Los únicos elementos con una movilidad destacada hacia la raíz serían Ba, Pb y Ni (Tabla 4.9).

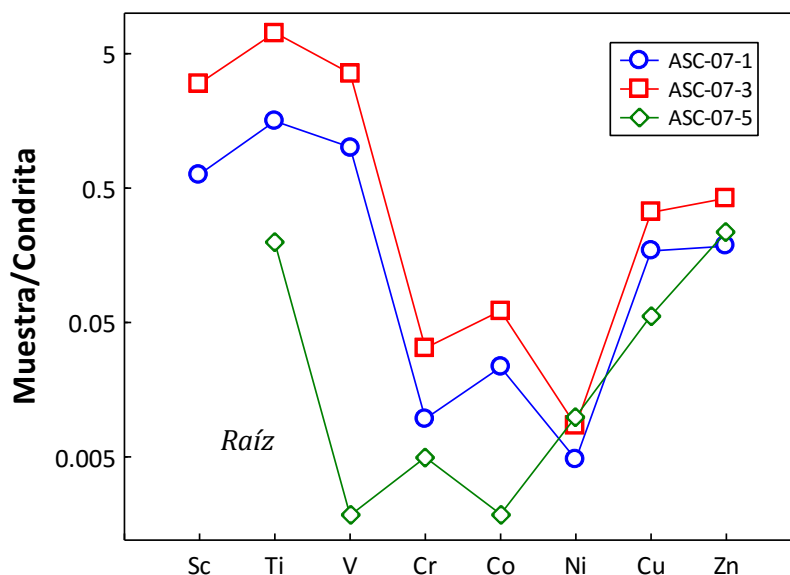


Figura 5.19: Patrones de metales de transición, normalizados a condrita, del coluvión ASC-07-1, el horizonte ASC-07-3 y la raíz de encino ASC-07-5.

5.6 Comentarios finales

Durante el presente trabajo se estudiaron cinco perfiles de suelo en el transecto Linares – La Ascensión. Las diferencias en mineralogía y geoquímica observadas entre los perfiles son, principalmente, el resultado de variaciones en el clima, la topografía y la roca madre. Cabe señalar que el presente estudio ha cubierto un muestreo desde un clima semicálido subhúmedo a templado subhúmedo. Como es de esperarse en estas regiones (Kabata-Pendias, 2011), el desarrollo de suelo sobre la roca madre ha sido relativamente

restringido (FCF = 68 cm de litosol, LCR = 180 cm de regosol, TAP = 135 cm de regosol, PAB = 231 cm de gypsol y ASC = 100 cm de rendzina).

Es evidente además que, en general, el espesor de suelo se incrementa desde la planicie (FCF), en donde domina un clima más seco, hacia la montaña (PAB), en condiciones más húmedas y de mayor altitud. En la planicie ocurre una mayor evaporación y, por tanto, disminuye la disponibilidad de agua en el suelo. En contraste, en la zona de montaña la evaporación es menor y disponibilidad de agua se incrementa.

El espesor de suelo más restringido es aquel generado desde la lutita en FCF, con un incremento significativo desde los carbonatos de LCR y la arenisca de TAP. El mayor desarrollo edafológico es observado desde el cuerpo de yeso en PAB.

En la mayor parte de los sitios de muestreo, existe una tendencia hacia un pH neutro o básico, como fue documentado por Batjes (1995) para estas regiones. Así mismo, se ha observado que, hacia la cima de los perfiles, existe una tendencia a la acumulación de carbonatos y la materia orgánica. Esta condición ya ha sido reportada en la literatura para suelos que parten de arcillas, carbonato y yeso (Kabata-Pendias, 2011).

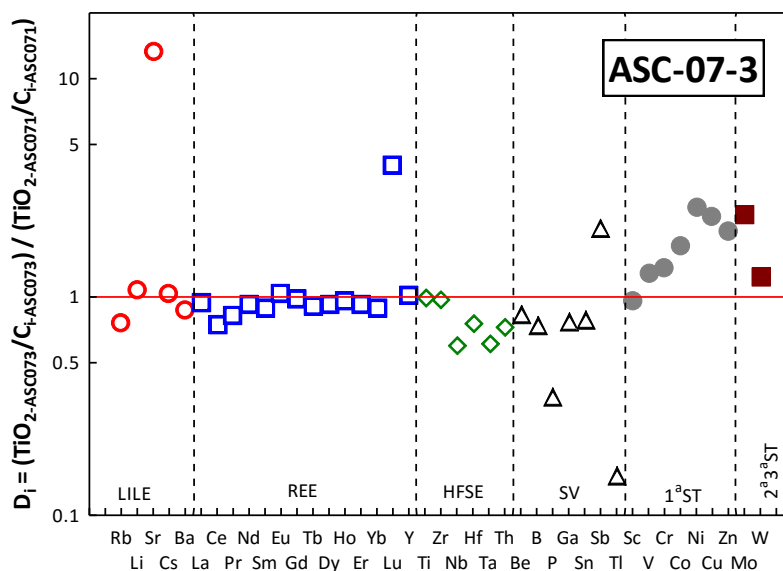


Figura 5.20: Variación del parámetro D_i , de acuerdo al tipo de elemento traza, para el horizonte de suelo ASC-07-3.

Se ha reportado (Carrillo-González *et al.*, 2006) que la movilidad de los elementos traza en sistemas edafológicos depende de: (a) el pH del medio, siendo mayor hacia condiciones ácidas, (b) el tipo y concentración de minerales arcillosos, (c) los tipos y concentraciones de compuestos orgánicos que constituyen al humus o materia orgánica (muchos de ellos con propiedades quelatantes) y (d) la concentración de óxi-hidróxidos de Al y Fe, que pueden actuar como sistemas de retención de elementos traza.

Estas condiciones que han sido expuestas pueden explicar porque la movilidad de elementos traza dentro de los perfiles edafológicos que se han estudiado sea tan restringida. Como ya se ha señalado, existe una tendencia hacia la alcalinización del pH, lo cual no ha favorecido el desplazamiento de los iones hacia horizontes superiores o a la vegetación. Kabata-Pendias (2011) señaló que en condiciones neutras o alcalinas los únicos elementos traza de alta movilidad serían B, Mo, W y Zn.

Cabe señalar que los minerales arcillosos que comúnmente se han encontrado en las muestras bajo estudio corresponden a illita y/o montmorillonita. Se ha reportado que estas especies tienen una capacidad importante de retención de metales de transición (Rybicka *et al.*, 1995).

Otro factor importante de retención de los metales podría estar asociado al desarrollo de horizontes de humus en los perfiles (Kabata-Pendias, 2011). Los compuestos que constituyen a la materia orgánica y que contienen grupos funcionales con O, N, S y P muestran capacidad de retención de elementos traza (Carrillo-González *et al.*, 2006).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Considerando, el marco climático, geológico y forestal, se ha desarrollado un estudio sobre la relación entre roca, suelo y vegetación en la región Noreste de México.

De forma específica, se han levantado cinco perfiles edafológicos en el transecto Linares – La Ascensión, Nuevo León: (a) Perfil FCF (Facultad de Ciencias Forestales, UANL; Linares, N.L.), consistente de un litosol de 68 cm de espesor, que parte de 60 cm de lutita calcárea (Formación Méndez); (b) Perfil LCR (Las Crucitas; Linares, N.L.), consistente de un regosol de 180 cm de espesor, que parte de 100 cm de caliza arcillosa (Formación San Felipe); (c) Perfil TAP (Tapias; Iturbide, N.L.), consistente de un regosol de 135 cm de espesor, que parte de 150 cm de arenisca calcárea (Formación Taraises); (d) perfil PAB (Pablillo; Galeana, N.L.), consistente de un gypsol de 231 cm de espesor, que parte de 127 cm de un cuerpo de yeso (Formación Minas Viejas); y (e) Perfil ASC (La Ascensión; La Chona, N.L.), consistente de una rendzina de 100 cm, que parte de un depósito de coluvión de 180 cm (Cuaternario).

El análisis edafológico tradicional ha revelado en los perfiles una tendencia general a la alcalinización ($\text{pH} = 5.9$ a 8.0) con el desarrollo de los horizontes, así como a un incremento en el contenido de carbonatos (0.7 a 63%) y de materia orgánica (0.5 a 7.7%). El análisis mineralógico a permitido establecer como especies principales en los perfiles a cuarzo, calcita, yeso, albita, illita y montmorillonita. En general, el arreglo de minerales observado en la roca madre se conserva en los horizontes edáficos. Durante el estudio se ha caracterizado además la composición química en elementos traza de la roca madre, horizontes edáficos y una raíz de encino desarrollada sobre el suelo.

La revisión de la información geoquímica, a través de la aplicación de diversos diagramas de variación y normalizados, ha permitido establecer una movilización restringida de elementos traza de tipo litófilo (LILE), lantánidos (REE), de campo electrostático fuerte (HFSE), semi-volátiles y metales de transición. Los únicos elementos que mostraron cierta capacidad de movilidad han sido el Sr, B, P_2O_5 y, en algunos casos, los metales de transición del segundo o tercer periodo. El estudio de la raíz de encino ha revelado la acumulación principalmente de Ba, Sr y B, así como, en algunos casos, de P_2O_5 , Ni, Pb y Zn.

El presente trabajo representa un esfuerzo inicial para entender la complejidad de los procesos de intemperismo y erosión durante el desarrollo de suelo y la vegetación en los alrededores y el interior de la Sierra Madre Oriental. Se recomienda extender el estudio a otras localidades de la región partiendo de sustratos distintos e incorporar técnicas no aplicadas en el estudio, tal como la evaluación de intercambio iónico de los horizontes edáficos.

REFERENCIAS

- Alanís-Rodríguez, E. 2006. Diversidad de especies arbóreas y arbustivas en áreas con distinto historial de uso antropogénico en el matorral espinoso tamaulipeco. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, N.L.
- Batjes, N.H. 1995. A global data set of soil pH properties. Technical Paper 27, International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, Holanda, 33 p.
- Bockheim, J.G., Gennadiyev, A.N., Hartemink, A.E., Brevik, E.C. 2014. Soil-forming factors and soil taxonomy. *Geoderma* 226-227, 231-237.
- Canizales-Velázquez, P. A., Alanís-Rodríguez, Aranda-Ramos, R., Mata-Balderas, J.M., Jiménez-Pérez, J. Alanís-Flores, G., Uvalle-Sauceda, J.I., Ruíz-Bautista, M.G. 2009. Caracterización Estructural del matorral submontano de la Sierra Madre Oriental, Nuevo León, México. *Revista Chapingo* 15, 115-120.
- Carrillo-Bravo, J. 1971. La plataforma de Valles-San Luis Potosí. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros* 23,1-102.
- Carillo-González, R., Simunek, J., Sauve, S., Adriano, D. 2006. Mechanisms and pathways of trace element mobility in soils. *Advances in Agronomy* 91, 111-178.
- Castellanos, J.Z., Uvalle, J.X. Aguilar, A. 2000. manual de intepetacion de analisis de suelos y aguas. Colección INCAPA, Mexico 262p.
- Chávez Cabello, G., Torres Ramos, J.A., Porras Vázquez, N.D., Cossío Torres, T., Aranda Gómez, J.J. 2011. Evolución estructural del frente tectónico de la Sierra Madre Oriental en el Cañón Santa Rosa, Linares, Nuevo León. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 53, 1-26.

- Deckers, J.A., Nachtergaele, F.O., Spaargaren, O.C. 1998. Word Reference Base for Soil Resources. Introduction. ISSS/ISRIC/FAO. Acco Leuven /Amersfoort, 165p.
- Estrada-Castillón, E., Yen-Méndez, C., Delgado-Salinas, A., Villarreal-Quintanilla, J.A. 2004. Anales del Instituto de Biología, UNAM 75, 73-85.
- Eguilúz De Antuñano, S., Aranda, G.M., Marrett, R. 2000. Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 53, 1-26.
- English, J.M., Johnston S.T. 2004. The Laramide Orogeny: what were the driving forces?. International Geology Reviews 46, 833-838.
- FAO 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report No. 84, Roma, Italia, 88 p.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Prentice Hall, Madrid, 715 p.
- Goldhammer, R.K. 1999. Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of north east México: Mesozoic sedimentary and tectonic history of north – central México. Geological Society of America Special Paper 340, 1-58.
- Goldhammer, R.K., Johnson, C.A. 2001. Middle Jurassic-Upper Cretaceous Paleogeographic evolution and sequence-stratigraphic framework of the northwest Gulf of México rim, in Bartolini, C., Buffler, R. T., and Cantú-Chapa, A., eds., The western Gulf of México Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems. American Association of Petroleum Geologists Memoir 75, 45-81.
- Hernández-Gómez, M.A., Villarreal-Quintanilla, J.A., Hernández-Javalera, I.I. 2012. Análisis multitemporal del cambio de uso de suelo y vegetación en áreas naturales protegidas con Perrito Llanero Mexicano (*Cynomys mexicanus* Merriam) en el Estado de Nuevo León. Agraria 9, 63-71.
- Honorato, R. 2000. Manual de Edafología. 4^{ta} Edición, Editorial Alfa-Omega, México, 267p.

- Imlay, R.W. 1953. Las formaciones jurásicas de México. Boletín de la Sociedad Geológica de México 16, 3-65.
- INEGI 2000. Los análisis físicos y químicos en la cartografía edafológica del INEGI: guía normativo-metodológica. INEGI, México, D.F., 37 p.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103, Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO); Roma, Italia, 117 p.
- Jenny, H. 1994. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. Dover Publications, Inc., New York, 191 p.
- Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O., Pando-Moreno, M., González-Tagle, M. 2009. Análisis sobre el efecto del uso de suelo en la diversidad estructural del matorral espinoso tamaulipeco. Madera y Bosques 15, 5-20.
- Juárez, M., Sánchez, J., Sánchez, A. 2006. Química del suelo y medio ambiente. Cuadernos de la Universidad de Alicante (España).
- Julca-Otiniano, A., Menses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., Bello-Amez, S. 2006. La material orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. IDESIA (Chile) 24, 49-61.
- Kabata-Pendias, A. 2011. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 505 p.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* 15, 259-263.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aranda-Gómez, J.J. 1982. Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí. Folleto Técnico 85, Instituto de Geología y Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- MacKenzie, W.S., Adams, A.E. 1994. A color atlas of rocks and minerals in thin section. Halsted Press, New York, 192 p.

- Manzano, M., Návar, J. 2000. Processes of desertification by goats overgrazing in the Tamaulipan thornscrub (matorral) in north-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments* 44, 1-17.
- Michalzik, D. 1986. Stratigraphy and Paleogeographic of the Northeast Sierra Madre Oriental, Mexico (Triassic – Lowermost Cretaceous): *Zentralblatt Geologische und Paläontologie* 9/10, 11-19.
- Montañez C. A., Ramírez G. J.G., Escalante M. J. C., Luévano A., López L. M., 2000 Carta Geológico Minera Concepción del Oro, G14-10, Escala 1:250,000, Estados de Coahuila y Nuevo León, Informe técnico.
- Murray, K.S., Rogers, D.T., Kauffman, M.M. 2004. Heavy metals in an urban watershed in Southeastern Michigan. *Journal of Environmental Quality* 33, 163-172.
- Nachtergaele, F., Van Velthuisen, H., Verelst, L. 2009. Harmonized World Soil Database (Version 1.1), FAO, Roma, Italia, 38 p.
- Navar, J., Synnott, T.J. 2000. Surface runoff, soil erosion and land use in northeastern Mexico. *Terra* 18, 247-253.
- Návar-Chaidez, J.J. 2008. Carbon fluxes resulting from land-use changes in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Carbon Balance and Management* 3, 1-11.
- NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario oficial de la federación, 7 de diciembre del 2001.
- Ocampo-Díaz, Y.Z.E., Guerrero-Suastegui, M., Jenchen, U. 2012. Petrografía y procedencia del miembro arenoso Galeana (Formación Taraises, Valanginiano-Hauteriviano temprano), Sierra Madre Oriental, NE México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 64, 335-352.
- Ortega Gutierrez, F., Sedlock, R.L., Speed, R.C. 1994. Phanerozoic tectonic evolution of Mexico. Chapter 5. DNAG Continent-Ocean Transitions. – Geological Society of America Special Paper, 265-306 p.

- Ortiz, B., Ortiz, C. 1980. Edafología. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, Estado de México, 331p.
- Padilla Y Sánchez, R.J., 1986. Post Paleozoic tectonics of Northeast México and its role in the evolution of the Gulf of México. *Geofísica Internacional*, 25, 157-206.
- Pando-Moreno, M., Molina, V., Jurado, E., Flores, J. 2014. Effect of biological soil crusts on the seed germination of three plant species under laboratory conditions. *Botanical Sciences* 92, 273-279.
- Pindell, J.L. 1985. Alleghanian reconstruction and subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas and Proto-Caribbean. *Tectonics*, 4, 1-39.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Poch, R. 2011. Introducción a la Edafología. Uso y Protección de suelos. Mundi-Prensa, Madrid, España, 849p.
- Porto Casanellas, J. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente, Mundi-Prensa, Madrid, España, 929 p.
- Polynov, B. 1930. Das Muttergestein als Faktor der Bodenbildung und als Kriterium für die Bodenklassifikation. *Soil Research* 2, 165-180.
- Rodríguez-Ortíz, J.C., Rodríguez Fuentes, H., de Lira Reyes, G., Martínez de la Cerda, J., Lara Mireles, J.L. 2006. Capacidad de seis especies vegetales para acumular Pb en suelos contaminados. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29, 239-245.
- Rodríguez-Laguna, R., Meza-Rangel, J., Vargas-Hernández, J., Jiménez-Pérez, J. 2009. Variación en la cobertura de suelo en un ensayo de procedencias de *Pinus greggi* Engelm en el cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León. *Madera y Bosques* 15, 47-59.
- Rodríguez H., Rodríguez, J. 2002. Métodos de Análisis de suelos y plantas. Criterios de interpretación. Editorial trillas, 196p.
- Rollinson, H.R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific & Technical, New York, 352p.

- Rybicka, E.H., Calmano, W., Breeger, A. 1995. Heavy metals sorption/desorption on competing clay minerals and experimental study. *Applied Clay Science* 9, 369-381.
- Santamaría-Orozco, D., Arenas-Partida, R., Escamilla-Herrera, A. 1990. Normalización de la Nomenclatura Estratigráfica en las Cuencas Mesozoicas de México (Etapa I: Zona Norte, Cretácico), Proyecto CAO-3052 Instituto Mexicano del Petróleo, 19, 102-106.
- Sedlock, R.L., Ortega-Gutierrez, F., Speed R.C. 1993. Tectonostratigraphic Terranes and Tectonic Evolution of México: Geological Society of America Special Paper 278, 153p.
- Soil Survey Staff 1975. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agricultural Handbook 436, Washington, D.C.
- Suter, M., 1990, Geología de la Hoja Tamazunchale, Estados de Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí, Carta Geológica de México, Serie de 1:100000, UNAM Inst. de Geología, (22), 55 p.
- United States Department of Agriculture (USDA) Soil Survey Staff 2003. Keys to soil taxonomy. 9th Ed. Washington, DC. Natural Resources Conservation Service, USDA, 322 p.
- Velasco-Tapia, F., Verma, S.P. 1996. El análisis químico de materiales geológicos. *Educación Química* 7, 180-184.
- Woerner, P.M. 1989. Métodos Químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas. Facultad de Ciencias Forestales, UANL, p. 46-48.